



TITLE:

UHVSF6ガス絶縁開閉装置の耐雷設計に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

松村, 晋

---

CITATION:

松村, 晋. UHVSF6ガス絶縁開閉装置の耐雷設計に関する研究. 京都大学, 1982, 工学博士

ISSUE DATE:

1982-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4678>

RIGHT:

UHV SF<sub>6</sub> ガス絶縁開閉装置  
の耐雷設計に関する研究

昭和56年10月

松 村 晋

# UHV SF<sub>6</sub> ガス絶縁開閉装置 の耐雷設計に関する研究

昭和 56 年 10 月

松 村 晋

DOC
1981
23
電気系

# UHV SF<sub>6</sub>ガス絶縁開閉装置の耐雷設計に関する研究

## 内 容 梗 概

この論文は、次期交流送電電圧と目される1000KV級UHV系統において、開閉装置としてSF<sub>6</sub>ガス絶縁開閉装置(GIS)を採用した変電所、すなわちSF<sub>6</sub>ガス絶縁変電所にギャップレスの酸化亜鉛形避雷器(ZnO避雷器)を適用した場合のUHV GISの耐雷設計について述べたもので、緒言、本章5章、結言からなっている。

まず、緒言では、経済性の面からみたGISに対する適正な耐雷設計の必要性和変電所耐雷設計法の現状を述べ、問題点を指摘して本研究の目的を明確にした。

第1章は、GISに対する耐雷設計の基本の一つである鉄塔の雷サージ特性について述べたもので、鉄塔のサージインピーダンスは、従来、実測の結果に基づいて塔頂からのサージインピーダンスが約100Ω、伝搬速度が光速の70～80%として取り扱われてきた。また、腕金、電線を含めた鉄塔の雷サージ特性の理論解析が困難なところから、今日まで必ずしも十分な検討がなされているとは言い難い。筆者は、鉄塔の雷サージ特性について、実測結果と理論解析の両面から従来の経緯を整理し、新しい観点から考案を加え、その結果、鉄塔を腕金の存在する上部と支柱部である下部の2つのサージインピーダンスの直列回路として表現し、鉄塔におけるサージの伝搬速度を光速とすることによって、変電所の耐雷設計を行う上からは、実用的な解析法を提案し、この論文で対象とするUHV鉄塔の雷サージ特性の根拠とした。

第2章では、まず、がい子装置のホーン・ギャップのV-t特性を精度よく模擬できる回路として一定電圧で開閉するスイッチ機能とCR素子を組み合わせた回路を考案し、これによりはじめてホーン・ギャップのV-t特性を直接デジタル計算回路に組み込み可能となることを示し、次いで、従来デジタル計算による解析的取り扱いが困難視されていたZnO避雷器の電圧-電流特性がサージ電流の波頭峻度によって変化する問題について考察を加え、制御回路用に開発されたプログラムを併用することにより解析可能となることを示すとともに、耐雷設計計算に当たっての取り扱い方を明確なものにした。

第3章では、従来、伝搬速度が光速の70～80%の単純な同心円筒回路として取り扱われているGISの雷サージ特性について、実用の500KV GISによる詳細な実験的研究を行い、その解析結果から(1)GIS内のサージの伝搬速度は光速とする。(2)GISのサージインピーダンスは同心円筒の理論式から得られる値とする。(3)しゃ断器、断路器等の構成機器には固有の



対地静電容量、インダクタンス等を忠実に付加する。ことによって、理論的にも妥当で実測結果ともよく一致する一般性のある解析が可能となることを示した。

第4章、第5章は、上記の第1章～第3章において述べた筆者の新しい解析法を1200KVのUHV送電線に適用して具体的解析を行ったもので、このうち第4章では耐雷面からみたUHV系統の特徴、GIS変電所への雷サージ侵入の様相とこれに影響を与える諸因子について明らかにするとともに、500KV系統において実施した変電所への雷サージ波形の観測結果を参考として示した。

第5章は、1200KVGIS変電所内における雷サージ分布を詳細に解析したもので、ZnO避雷器による保護効果の解析を通じて、ZnO避雷器適用に関する考え方を新しく指摘するとともに、具体的に最適設計結果とその場合の雷インパルス絶縁レベル(LIWL)を明らかにした。

最後に、以上各章の内容をとりまとめ、再整理するとともに、ZnO避雷器で保護されたGIS変電所に対する的確な耐雷設計法が確立できたことにより、今後のUHVGIS開発の基礎として役立つことを述べ結言とした。

# 目 次

緒 言 .....	7
第1章 鉄塔の雷サージ特性とその表現法 .....	10
1.1 鉄塔の雷サージ特性に関する実測結果について .....	10
1.2 鉄塔のサージインピーダンスに対する解析的取り扱いについて .....	12
1.2.1 J o r d a n の式 .....	12
1.2.2 垂直アンテナに対する進行波理論による式 .....	13
1.2.3 垂直円柱にM a x w e l l の電磁方程式を適用した式 .....	13
1.2.4 M a x w e l l の電磁界理論により求める式—ループ電圧法— .....	14
1.2.5 鉄塔を等価垂直円錐体と見なした式 .....	16
1.3 鉄塔の雷サージ特性の測定について .....	17
1.3.1 測 定 法 .....	17
1.3.2 各測定法の特徴 .....	17
1.3.3 光学式アナログ信号伝送系による3 5.3 m送電鉄塔の雷サージ 特性の実測と結果 .....	21
1.4 鉄塔の雷サージ特性に関する考察 .....	24
1.4.1 サージインピーダンスについて .....	24
1.4.2 伝搬速度について .....	30
1.5 鉄塔の等価モデルと鉄塔サージインピーダンスの表現法 .....	31
第2章 がい子装置のホーンギャップのV—t特性およびZnO避雷器の演算上の表現 .....	35
2.1 がい子装置のホーンギャップのV—t特性の表現法 .....	35
2.2 ZnO 避雷器の制限電圧特性と時間効果 .....	37
2.3 E M T P におけるZnO 避雷器の時間効果を考慮した計算法 .....	37
2.4 ZnO 避雷器のT A C Sによる計算法の検証と表現法 .....	39
第3章 G I S の雷サージ特性とその表現法 .....	43
3.1 5 0 0 K V G I S における雷サージ特性の実測 .....	43
3.1.1 対象G I S の構成 .....	43
3.1.2 測定方法と測定結果 .....	46

3. 1. 3	実測結果に対する考察 .....	47
3. 2	G I S の雷サージ特性の解析法 .....	53
3. 2. 1	構成機器の表現法 .....	53
3. 2. 2	5 0 0 K V G I S の E M T P による解析結果 .....	54
3. 2. 3	G I S 内のサージ電圧分布からみた検討 .....	58
3. 3	サージ計算に必要な G I S の表現法 .....	60
第 4 章	U H V 送電線から G I S 変電所への侵入雷サージの解析 .....	62
4. 1	具体的解析方法 .....	62
4. 2	解析上の基本的条件 .....	63
4. 2. 1	U H V 鉄塔のサージインピーダンスと導体類の諸定数 .....	63
4. 2. 2	U H V 用ホーンギャップの V - t 特性とその表現 .....	65
4. 2. 3	鉄塔腕金のインダクタンス .....	65
4. 2. 4	塔脚接地抵抗 .....	65
4. 2. 5	架空線と G I S の接続部 ( G I S 入口 ) における静電容量 .....	66
4. 2. 6	G I S .....	66
4. 3	解析回路の構成 .....	67
4. 4	解 析 結 果 .....	68
4. 4. 1	直撃雷による鉄塔電位上昇と逆閃絡 .....	68
4. 4. 2	G I S 変電所への侵入サージ .....	71
4. 5.	侵入サージに影響する諸因子 .....	73
4. 5. 1	鉄塔表現法の相違による影響 .....	73
4. 5. 2	鉄塔腕金のインダクタンス .....	74
4. 5. 3	塔脚接地抵抗 .....	75
4. 5. 4	引込鉄塔からの引込線 .....	75
4. 5. 5	架空線と G I S の接続部の静電容量 .....	77
4. 5. 6	G I S 入口に設けた Z n O 避雷器 .....	78
4. 6	5 0 0 K V 送電線から変電所へ侵入する雷サージ波形観測結果からの考察 .....	80
4. 6. 1	実系統における雷サージ波形の観測 .....	80
4. 6. 2	観測装置の概要 .....	81
4. 6. 3	観 測 結 果 .....	81

第 5 章	1 2 0 0 K V G I S 変電所の耐雷設計 .....	84
5.1	1 2 0 0 K V G I S 変電所 .....	84
5.2	対象回路の選定 .....	85
5.3	解析回路の構成 .....	87
5.4	解析ケース .....	89
5.5	解 析 結 果 .....	91
5.5.1	1 T r が接続された回路の解析結果 .....	91
5.5.2	2 T r が接続された回路の解析結果 .....	102
5.5.3	避雷器の V - I 特性が F 特性に向上した場合 .....	103
5.6	1 2 0 0 K V G I S 変電所の耐雷設計と L I W L .....	105
結 言	.....	107
主要記号表	.....	110
参 考 文 献	.....	113
謝 辞	.....	117
付 録		
付録 1.	EMTP ( T A C S を含む ) の概要について .....	119
付録 2.	Z n O 素子の定数について .....	138
付録 3.	UHV 送電線のサージインピーダンスについて .....	142
付録 4.	各解析ケースにおける電位波形、電流波形および各節点の電圧ピーク一覧...	148
付録 5.	G I S のサージ伝搬特性の具体例 .....	194
付録 6.	S F <sub>6</sub> ガスの特性と G I S の絶縁設計について .....	195
付録 7.	UHV G I S 変電所の概念設計例 .....	198
あ と が き		

# 6 項欠

(1)

SF<sub>6</sub> ガス絶縁開閉装置 (SF<sub>6</sub> Gas Insulated Switchgear, 以下GISと略す) は1968年実用化に成功して以来、用地の節減、安全性、高信頼度、運転・保守の省力化その他の利点から急速に普及しているところから、次期のUHV (公称電圧1000kV以上) 変電所では、このGISが経済的有利性も加わって積極的に採用される気運にある。(2)

また、ごく最近製品化に成功した酸化亜鉛形避雷器<sup>(3)</sup> (Zinc-Oxide Arrester, 以下ZnO 避雷器と略す) は、優れた非直線性によって低い保護レベルが得られるほか直列ギャップを使用していないため急峻なサージに対しても動作遅れがない等面期的なサージ保護特性をもっているため、本格的な採用も時間の問題とみられており、早晩、ZnO 避雷器で保護されたGIS変電所が世界の標準になるものと思われる。<sup>(4)</sup>

GISの絶縁寸法は、SF<sub>6</sub> ガスの絶縁特性上雷インパルス絶縁レベル (Lightning Impulse Withstand Level, 以下LIWLと略す) によってきまるので、LIWLの低減は直ちにGIS母線径の縮小をもたらす<sup>(5)</sup>、GISの経済性に大きく影響する。<sup>(6)</sup> [付録-6] この効果は、高電圧になるほど著しいので、UHV GISの経済設計はいかにしてそのLIWLの低減をはかるかが鍵であり、このためにZnO 避雷器の合理的で、かつ信頼性ある適用に期待が寄せられる一方、精度の高い耐雷解析が必要になる。

しかしながら、GIS、ZnO 避雷器ともにいまだ歴史が浅いこともあって、ZnO 避雷器を適用したGIS変電所の耐雷設計についての確かな解析を行った例が見当たらないので、UHV GISの耐雷設計は、下記の問題点を含んだまま従来の手法を適用して行なわれている。したがって、合理的で信頼性が高く、経済的なUHV GISの耐雷設計に当っては、これらの問題点について考察しておくことが必要である。

(1) 変電所の耐雷設計として与えられる条件の一つに、変電所への侵入サージ電圧値がある。

この電圧値としては、一般に第1鉄塔への直撃雷による逆閃絡サージの侵入が、最も過酷な条件となるので、この電圧値を採用してきた。この逆閃絡サージ電圧の算定には、鉄塔の雷サージ特性が基本となるが、従来はこの特性を、実用鉄塔の実測結果に基づいて、塔頂からのサージインピーダンスが約100Ω、伝搬速度が光速の70~80%として<sup>(7)</sup> 取り扱ってきた。しかし、この値は、これまでに発表されている鉄塔理論による計算値とは一致しないので、理論的根拠が明確になっているとは言い難く、また、この論文で対象としているUHV系統用の巨大な高鉄塔に、従来の鉄塔で得られた数値をそのまま適用することには疑



間がある。

- (2) がい子装置のホーンギャップについても、その閃絡特性を回路に折り込んだ計算は行われておらず、場合によっては全く省略されている。
- (3)  $ZnO$  避雷器については、直列ギャップがなく、 $ZnO$  素子の特性に依存しているため、侵入サージ電流の波頭峻度によって、その $V-I$ 特性が変化するので、解析にあたってはこの影響を考察する必要があるにもかかわらず、何らの考察もしないで、単に特性が向上した従来どおりのギャップ付避雷器と同等に見なされている。<sup>(8)</sup>
- (4) GISは単純な $SF_6$  ガス絶縁の同心ケーブルとして取り扱われている一方、GISに<sup>(9)</sup>おけるサージ伝搬速度にいたっては、未だ合理的な考え方も、適正な値も定められていない。<sup>(10)</sup>

〔付録-5〕

このような現状から、この論文では、従来十分に解明されないままであったGISの耐雷設計について、実験的研究および解析的研究を行って、理論的にも妥当で、かつ、測定結果ともよく一致する実用的な解析法を確立した。すなわち、

- (1) 変電所への侵入雷サージについては、鉄塔の雷サージ特性に依存しているので、この雷サージ特性について、測定および理論解析の両面から従来の経緯を整理し、これらの結果に対する比較研究を行って問題点を指摘するとともに、その結果から、鉄塔形状を考慮し、かつ、変電所の耐雷設計に適した新しい解析的手法を提案し、これによってこの論文に必要なUHV送電鉄塔の雷サージ特性を表現する根拠を与えた。
- (2) がい子装置のホーンギャップについて、その $V-t$ 特性が実測結果とよく一致し、かつ、解析回路に直接組み込み可能な等価回路を考案した。
- (3)  $ZnO$  避雷器について、侵入サージ電流の波頭峻度による $V-I$ 特性の変化を考慮した解析法を示すとともに、具体的解析を通じて、 $V-I$ 特性の実用的な取り扱い方を明確なものにした。
- (4) GISの雷サージ特性について、500 kVの実用GISが世界ではじめて完成したのを機会に、詳細な実験的研究を行ってその実態を把握するとともに、解析的研究を通じて実用的な解析法を明らかにした。
- (5) 鉄塔、ホーン・ギャップ、 $ZnO$  避雷器、GISに関する以上の研究成果に基づいて、UHV GIS変電所に対する詳細な耐雷設計解析を行い、変電所への侵入雷サージの様相を明らかにするとともに、耐雷設計に関する最適結果について述べ、これによって、 $ZnO$  避雷器を適用したGIS変電所に対する精度の高い的確な耐雷設計法を具体的に示した。

なお、UHV電圧としては、1200 kV<sup>(11)(12)(13)</sup>を選び、解析はすべて米国のBonneville Power Administration (BPAと略す)で開発された Electro Magnetic Trans-  
ient Program<sup>(14)</sup> (EMTPと略されている。付録-1)を用いて、IBM S370/168によるデジタル計算によって行った。

## 第1章 鉄塔の雷サージ特性とその表現法

鉄塔の雷サージ特性については、諸説があり、近年の耐雷設計では、鉄塔の雷サージ特性を実用鉄塔に対する現地実測を基に、2回線送電用鉄塔では、一般にサージインピーダンスを約 $100\Omega$ 、伝搬速度を光速の $70\sim 80\%$ として解析している。本論文で対象としているUHV送電線とそれに接続するGISの絶縁設計、特に耐雷設計を行うに当たっては、変電所に接続される送電線の第1鉄塔における逆閃絡電圧をベースとするので、鉄塔の雷サージ特性を実測結果と理論的解析とから明らかにする必要がある。鉄塔はその形状、構造が複雑な構造物であり、厳密に解析することは極めてむづかしいので、現状では、上述のように実測結果と理論解析との両面から基本的な考察を加え、変電所の耐雷設計を対象とする場合、実用上十分であろうと考えられる鉄塔モデルを考案し、これにより鉄塔雷サージ特性を論ずることにした。もちろん、この論文の論旨はZnO避雷器で保護されたUHVGISの耐雷設計にあるので、この鉄塔モデルはその目的に適する程度にとどめ、こゝでは例えば、逆閃絡現象などを論じたものではない。

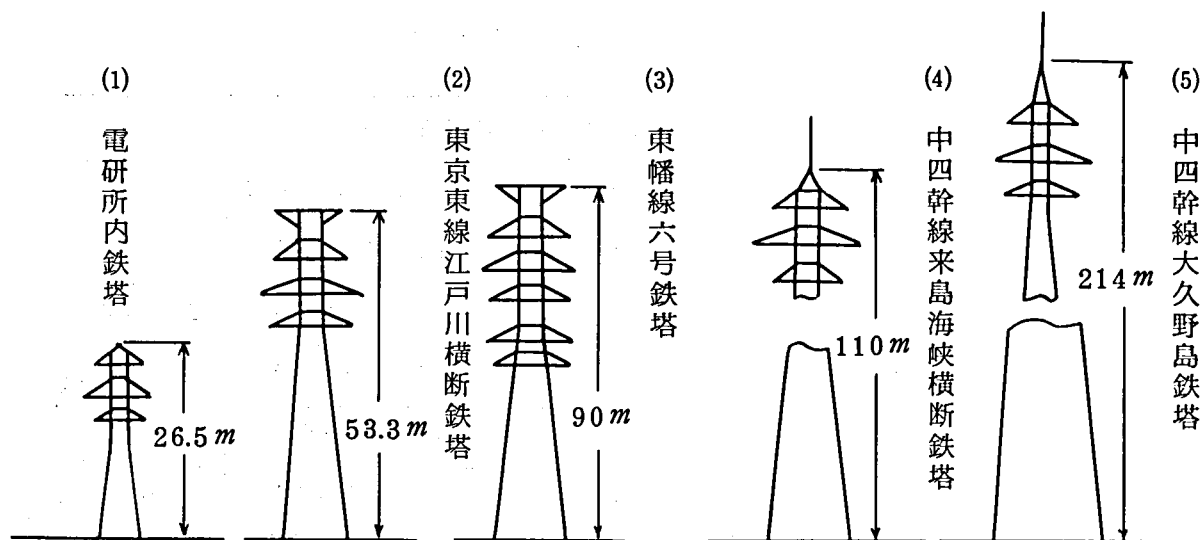
### 1.1 鉄塔の雷サージ特性に関する実測結果について

鉄塔の雷サージ特性が注目されはじめたのは、超高圧送電線が出現し地上高が $50m$ をこえる鉄塔における雷撃事故の解明に起因しているようである。すなわち、米国におけるOhio Valley Electric Corporation (OVECと略す)の $345kV$ 送電線の雷事故率が、鉄塔塔脚の接地抵抗が $5\Omega$ 以下の低接地抵抗であるにもかかわらず、予測算定値の $10$ 倍以上に達した実例<sup>(15)(16)</sup>があり、従来の鉄塔雷電流に塔脚接地抵抗と鉄塔インダクタンスの和を乗じた電位上昇による逆閃絡説では説明できなくなり、 $1956$ 年頃その原因を鉄塔インピーダンスと急峻波頭雷電流の組合せによるとする説が台頭した<sup>(17)</sup>。米国のみならず、わが国においても、 $275kV$ 超高圧送電線の雷撃事故が続出したために、内外ともにこの方面の研究が活発化し、多くの議論が行われるようになった。次いで、 $500kV$ 送電時代を迎えたが、雷撃事故率は再び当初の予想を上廻っており、特にわが国では2回線鉄塔の中相事故率が高く<sup>(18)(19)</sup>、現在なお、その原因究明をめぐって、架空地線のしゃへい失敗説を含めて活発な討議が行われる一方、落雷現象、鉄塔サージ特性の実測をはじめ、多くの研究が行われつつあることは周知のとおりである。

鉄塔の雷サージ特性の実測はこのような背景から活発化してきたものであるが、その測定結果は従来必ずしも一致せず明確さを欠いているが、これは鉄塔が垂直導体で、かつ、サ

ージの上下の往復時間が  $1\ \mu\text{s}$  以内という短い時間の極めて測定し難い現象であるほか、測定方法の差違によるところが大きい。測定方法と問題点については、1.3.2において述べるが、川合幹雄氏がこの点を研究され、直接法と呼ばれる方法を開発された<sup>(20)</sup>。これは、インパルス発生器と測定用高速度ブラウン管を鉄塔頂上に設置して測定する方法であって、現在のところ得られるデータの信頼性が最も高いとされており、わが国では事情の許す限り、この方法によって測定するのが通例となっている。

第1.1図に示す鉄塔5基について、直接法によって実測したサージインピーダンスの時間

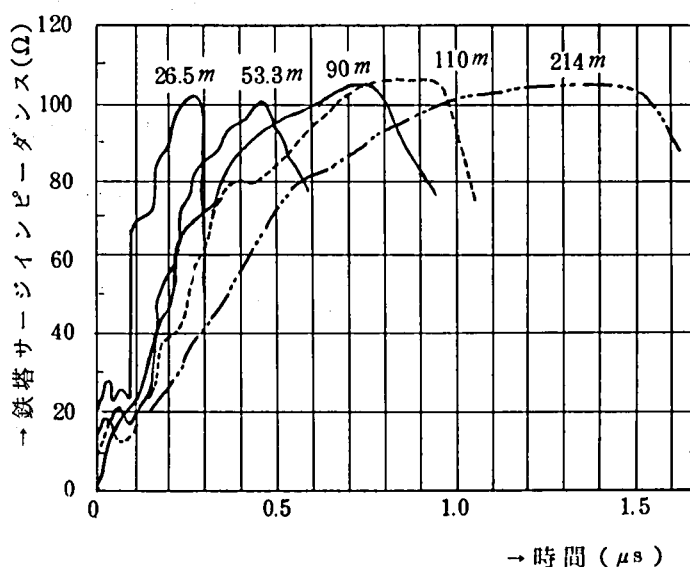


第1.1図 測定鉄塔

変化を第1.2図に示す。

鉄塔(1)、(2)、(4)、(5)は川合氏が1960年前後に実測したもので<sup>(21)</sup>(3)は筆者等が1974年に実測したものである<sup>(22)</sup>。侵入サージ電流はいずれも波頭長が、 $0.05\ \mu\text{s} \sim 0.1\ \mu\text{s}$  の急峻波形を用いている。

第1.2図によると、鉄塔のサージインピーダンスは初期には低い値であるが、



第1.2図 サージインピーダンスの時間特性

鉄塔上をサージ電流が進行するに従って次第に増加する。次いで、サージ電流が塔脚の接地部に到達すると負の反射を生ずるので、サージが塔頂と塔脚の接地部を往復する時間には対応して、サージインピーダンスは急激に低下しはじめる。通常、この低下をはじめ直前のサージインピーダンスが鉄塔のサージインピーダンスとされ、また、これまでに至る時間から得られる速度が鉄塔におけるサージの伝搬速度と称されている。第 1.2 図の結果をまとめて表にしたのが第 1.1 表である。

第 1.1 表 直接法による測定結果

鉄 塔			サージインピーダンス(Ω)		伝搬速度( $m/\mu s$ ) ( )内は光速に対する%	備 考
記号	回線数	高さ(m)	初 期 部	後 期 部		
(1)	2	26.5	20	100	213 (71%)	
(2)	2	53.3	35~40	100	237 (79%)	275 kV
(3)	4	90.0	40~50	105	240 (80%)	500 kV×2 77 kV×2
(4)	2	110.0	40~50	108	243 (81%)	220 kV×2
(5)	2	214.0	40~60	105	285 (95%)	220 kV×2

この表の(1)(2)(4)(5)が、さきに述べた近年の耐雷設計において鉄塔のサージインピーダンスを約100Ω、伝搬速度を光速の70~80%として採用する根拠となっているものである。  
(3)はこれらを補完するものであり、同様の結果は他にも発表されている。<sup>(23)</sup>

## 1.2 鉄塔のサージインピーダンスに対する解析的取り扱いについて

鉄塔のサージインピーダンスの解析的取り扱いとしては、古くから進行波法あるいは電磁界理論によって行われている。

主なものを概観すると次のとおりである。

### 1.2.1 Jordan の式<sup>(24)</sup>

1930年代にC. A. Jordanによって発表されたもので、鉄塔を半径 $r$ の等価円筒とした場合、鉄塔高さを $H$ とすると、鉄塔のサージインピーダンス $Z_T$ は

$$Z_T = 60 \log_n \frac{H}{r} + 90 \frac{r}{H} - 60 \quad (\Omega) \quad (1.1)$$

で与えられるとするもので、普通の鉄塔では約  $100\Omega$  の計算結果が得られることから、古くから定説的に広く使用されてきた。しかし、導出の過程は必ずしも理論的に明快なものとはいえない点がある。

### 1.2.2 垂直アンテナに対する進行波理論による式 (25)

鉄塔を大地に垂直な無損失の単導体と見なすと、高さ  $H$  が等価半径  $r$  に比し十分大きい場合には、

$$L \simeq \frac{\mu_0}{2\pi} \ell_n \frac{2H}{r}$$

$$C \simeq \frac{2\pi\epsilon_0}{\ell_n \frac{2H}{r}}$$

となるので、これから

$$Z_T = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ell_n \frac{2H}{r} \quad (1.2)$$

として求めるもので、垂直単導体に対しては現在も広く用いられている。

### 1.2.3 垂直円柱にMaxwell の電磁方程式を適用した式 (26)

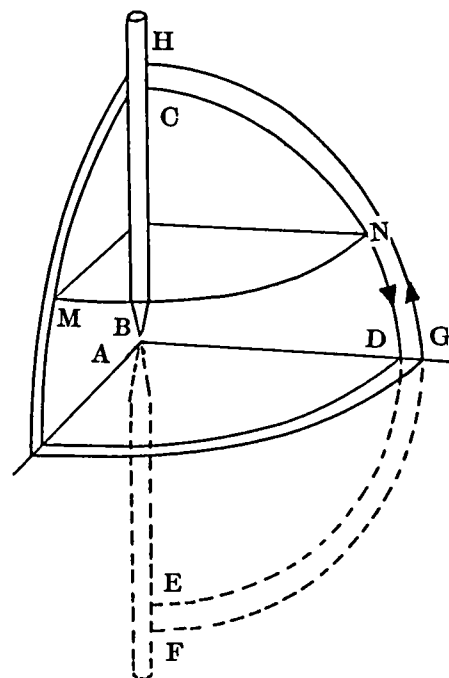
C.F.Wagner と A.R.Hileman によって導かれた式で、第 1.4 図に示すように鉄塔を垂直円柱とし、ステップ電流波が光速で進行するものとして、ベクトルポテンシャル  $A$  を求め、これから  $Z_T$  を算出する方法である。

$r \ll C_0 t$  ( $C_0$  は光速) の場合には

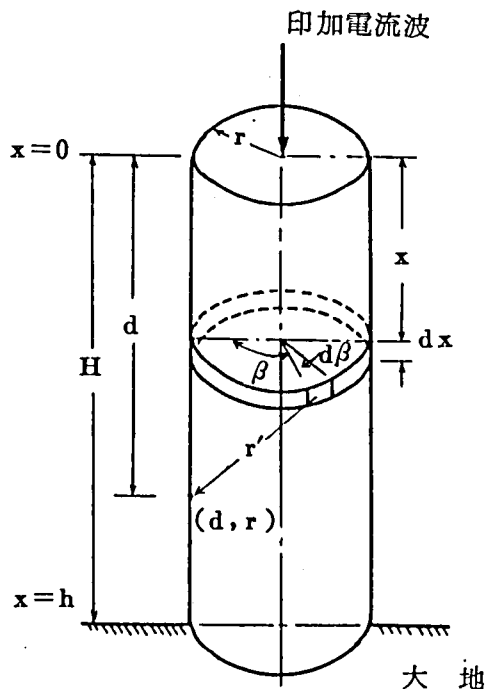
$$Z_T = 60 \ell_n \frac{\sqrt{2} C_0 t}{r}$$

( 1.3 )

となるので、これから最大値は



第 1.3 図 アンテナ理論によるサージインピーダンスの求め方



第 1.4 図 電磁界理論によるサージインピーダンスの求め方



$$Z_T = 60 \lg \frac{2\sqrt{2}H}{r} \quad (t = \frac{2H}{c_0}) \quad (1.4)$$

で与えられる。

1.2.4 Maxwell の電磁界理論により求める式 — ループ電圧法 — (27)(28)

R・Lundholmによって、導き出された式で、Maxwell の電磁理論を用いて導体上のステップ電流波の印加点を中心とする電磁波の作用球を考え、この作用球内に存在するループ回路上のギャップに発生する電圧  $v_g$  を

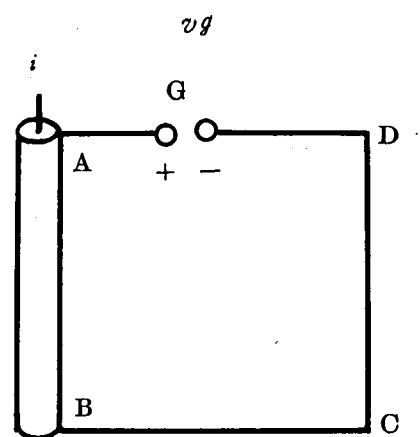
$$v_g = \oint E ds = \oint \frac{\partial A}{\partial t} ds \quad (1.5)$$

によって求めるもので、導体に沿った積分路を規定することにより、導体のサージインピーダンスが得

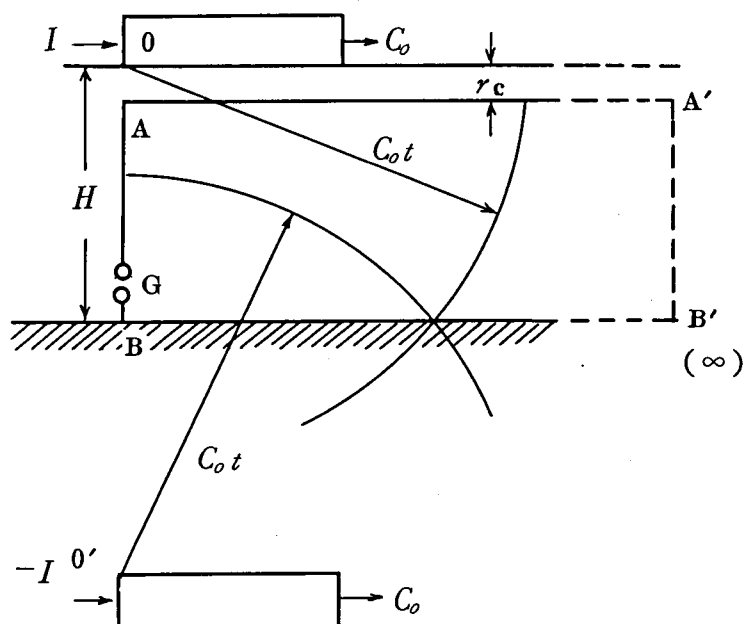
られるので、ループ電圧法とよばれている。算出にあたっては、電荷により生ずる静電界は閉回路に沿った積分値が0になることから、これを無視し、磁界成分のみを考慮しているが、ループ電圧法という巧みな手法によって比較的簡単にかつ理論的にも厳密に、サージインピーダンスを求め

得るのみならず、上記のギャップを鉄塔上のがい子連とすることにより、この間にかかる電圧を Maxwell の電磁理論から直接算出し得るとされている。

この理論によれば、地上高  $H$  の大地上にこれと平行に張られた半径  $r_c$  の導線上をステップ電流波が光速で伝搬する場合  
には、この導線のサージ



### 第 1.5 図 ループ電圧法の原理

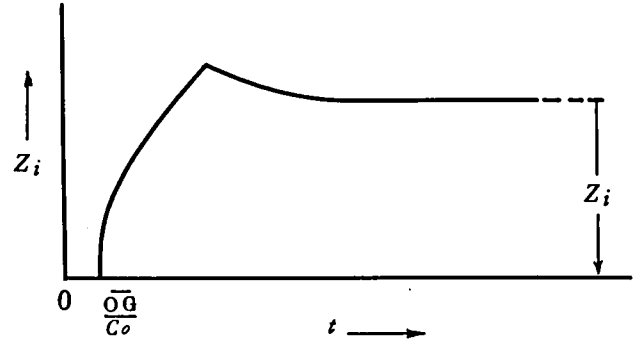


### 第 1.6 図 大地平行単導線のサージインピーダンスの求め方

インピーダンス  $Z_i$  は次式で与えられる。

$$Z_i = 60 \ell_n \frac{\sqrt{2} C_o t}{r_c} \quad (1.6)$$

$$\frac{\overline{OG}}{C_o} < t < \frac{2H-r_c}{C_o}$$

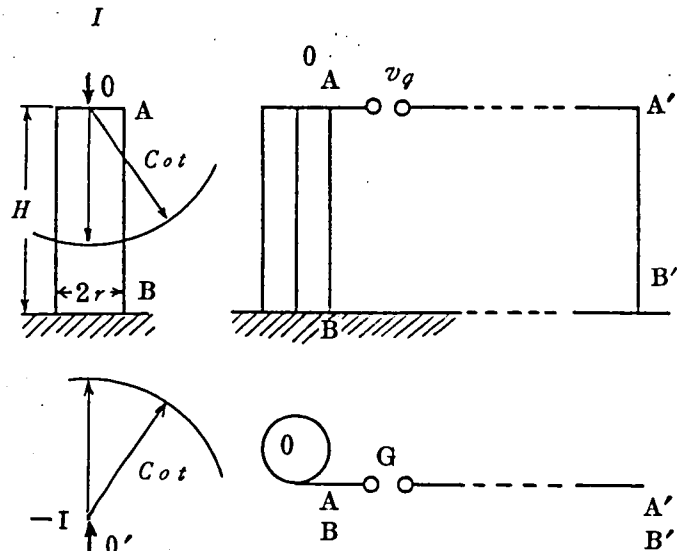


第 1.7 図 大地平行単導線のサージインピーダンスの時間変化

$$= 60 \ell_n \left( \frac{\sqrt{2} C_o t}{r_c} \right) \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{2H}{C_o t} \right)^2} \right\}^{1/2} \quad (1.7)$$

$$\simeq 60 \ell_n \frac{2H}{r_c} \quad \left( t \gg \frac{2H}{C_o} \text{ の場合} \right) \quad \left. \vphantom{\frac{2H}{C_o}} \right\} t > \frac{2H-r_c}{C_o} \quad (1.8)$$

次に、高さ  $H$ 、半径  $r$  の垂直円筒導体の中心をステップ電流波が光速で進行する場合、ギャップ  $G$  に現れる電圧  $v_g$  は、ベクトルポテンシャルが大地に垂直な成分のみをもつのでループ  $ABB'A'A$  のとき  $AB$  のみに着目すればよいこととなり、次の結果となる。



第 1.8 図 垂直導体のサージインピーダンスの求め方

$$v_g = 0 \quad 0 < t < \frac{\overline{OG}}{C_o} \quad (1.9)$$

$$v_g = 30 I \ell_n \left\{ \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \left( \frac{r}{C_o t} \right)^2}} \right\} \quad \frac{\overline{OG}}{C_o} < t < \frac{\sqrt{4H^2 + r^2}}{C_o} \quad (1.10)$$

$$\simeq 60 \ell_n I \frac{\sqrt{2} C_o t}{r} \quad (t \gg r/C_o \text{ の場合}) \quad (1.11)$$

従って、鉄塔のサージインピーダンス  $Z_T$  は

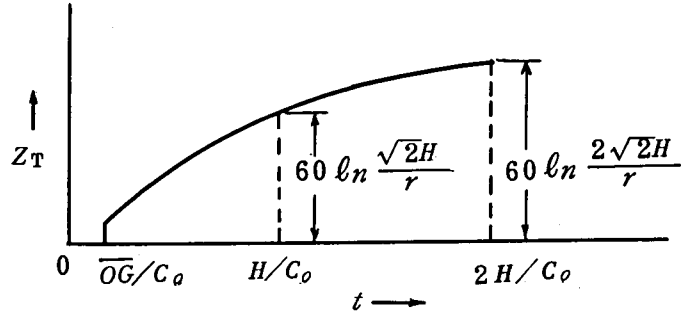
$$Z_T = 0 \quad 0 < t < \frac{\overline{OG}}{C_o} \quad (1.12)$$

$$Z_T = 30 \ell_n \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{C_o t}\right)^2}} \quad (1.13)$$

$$\simeq 60 \ell_n \frac{\sqrt{2} C_o t}{r} \quad (t \gg \frac{r}{C_o}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\overline{OG}}{C_o} < t < \frac{\sqrt{4H^2 + r^2}}{C_o} \end{array} \right. \quad (1.14)$$

となり、その最大値は (1.4) 式と同様に次の (1.15) 式で表わされる。

$$Z_T = 60 \ell_n \frac{2\sqrt{2} H}{r} \quad (1.15)$$

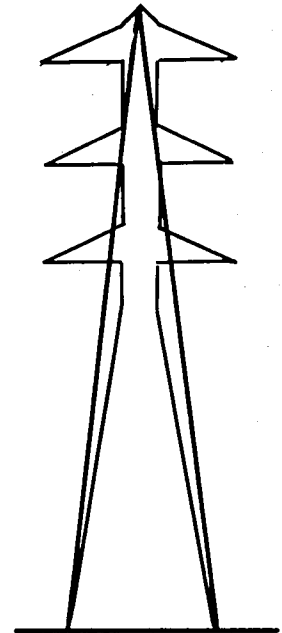


第 1.9 図 垂直導体のサージインピーダンスの時間変化

#### 1.2.5 鉄塔を等価垂直円錐体と見なした式<sup>(29)</sup>

M.A.Sargent と M.Darveniza は、鉄塔を第 1.10 図に示すように、等価垂直円錐体と見なし、その頂点にステップ電流波が流入するものとし、電磁界理論を適用して  $Z_T$  として次の式を導き出した。

$$Z_T = 60 \ell_n (\sqrt{2}/\sin \theta) \quad (1.16)$$

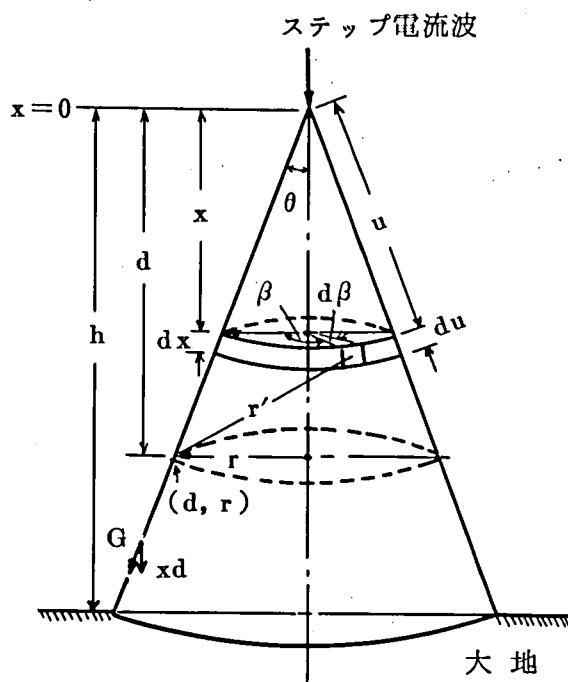


第 1.10 図 等価垂直円錐体

ただし、 $\theta$  は第 1.11 図に示すように円錐体の頂角の  $1/2$  である。この式の特徴は、鉄塔のサージインピーダンスは、鉄塔高さおよび時間に無関係になることである。

以上のとおり、解析によって鉄塔のサージインピーダンスを求める式は、上記に示したように電磁界理論を直接適用して求めるものと、進行波法によって得られるものとがある。

しかし、一般の耐雷設計に電磁界理論を適用することは、厳密ではあるが、鉄塔構造が複雑であるので、その解析が極めて困難であるため、未だ応用されるには至っておらず、現状では進行波法が広く利用されている。



第 1.11 図 サージインピーダンスの求め方

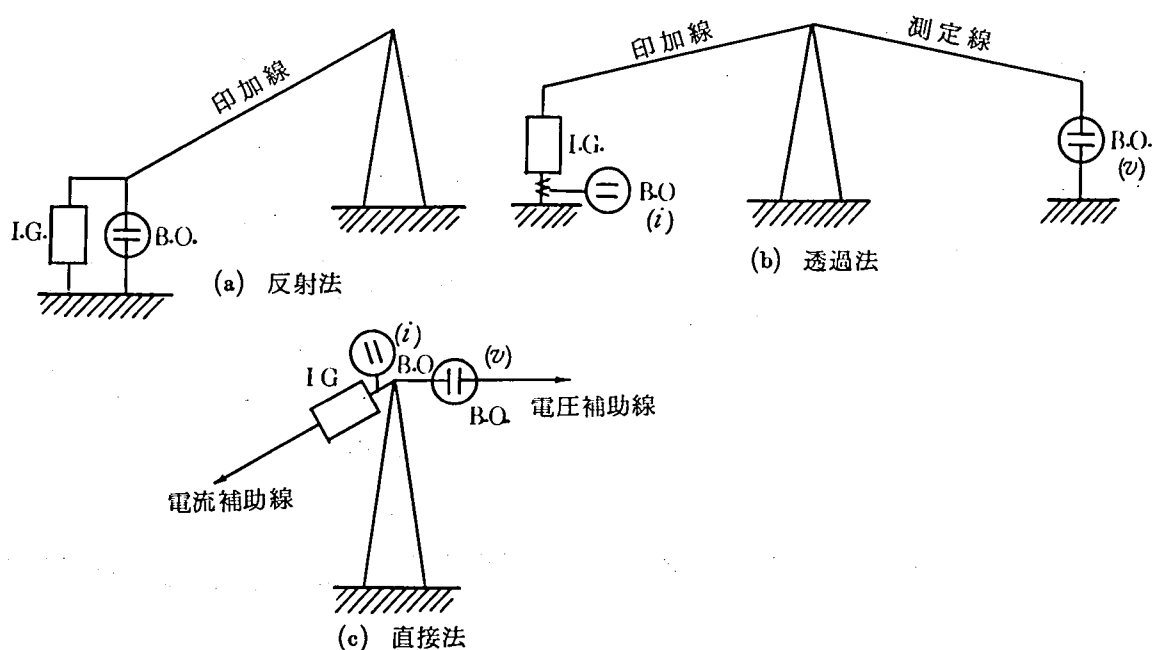
### 1.3 鉄塔の雷サージ特性の測定について

#### 1.3.1 測定法

鉄塔の雷サージ特性を実測により求める方法は (1)反射法<sup>(30)</sup> (2)透過法<sup>(31)</sup> (3)直接法<sup>(32)</sup> に大別される。第 1.12 図は、これらの概念図を示したもので、反射法は、図示のように塔頂への印加線を斜めに引き下し、定電流を流入し、塔頂からの反射電圧波を測定する。透過法は、電流印加線と測定線を分離し、鉄塔透過電圧波を測定する。反射法、透過法がインパルス発生器およびブラウン管オシロスコープを地上に設置するのに対して、直接法ではこれらを鉄塔の塔頂に設置し、定電流を鉄塔に流入して、鉄塔の電位上昇を測定する。電流、電圧の補助線は、鉄塔に対してこれらが相互に直角になるように張り、相互作用を除くことが理想であるが、実際には鉄塔と斜めになる場合や、便宜的に架空地線が利用される場合もある。もちろん、補助線の接地点は鉄塔から出来る限り遠方の点とすることが望ましい。

#### 1.3.2 各測定法の特徴

第 1.13 図は、印加線のサージインピーダンスが一定と見なせる場合に、反射法によっ



第 1.12 図 鉄塔の雷サージ特性測定法

て、印加端に現われる電圧波形をモデル的に示したものである。

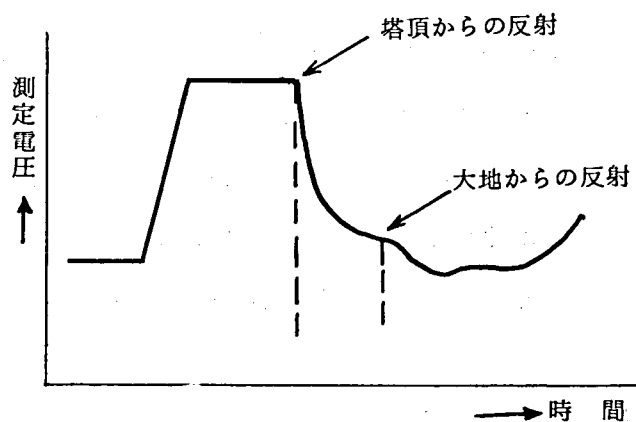
印加線が水平に張られている場合には、( 1.8 ) 式によりこの条件を満たしており、斜めに張った場合には、印加線が高くなるに従い太い線を接続することにより、この条件を満足させるようにすることができる。この場合は、測定反射電圧の印加電圧に対する比を  $e_r$  とすると、鉄塔のサージインピーダンス  $Z_T$  は、次式から求めることができる。

$$Z_T = \frac{F_r + e_r}{F_r - e_r} Z_o \quad (1.17)$$

ただし、 $Z_o$  は印加線のサージインピーダンス

$F_r$  は印加線始端から測定器  
へ向かう透過係数

この結果、 $Z_T$  は初期部が  
高く、時間とともに漸減する



第 1.13 図 反射法による測定結果

変化として現われる。

なお、印加線のサージインピーダンスが一定と見なし得ない場合には印加線をそれぞれサージインピーダンスの異なる何本かの単導線の直列接続回路と見なし、(1.17)式を拡張して $Z_T$ を算出することができる。<sup>(33)</sup>

反射法は米国において、G.D.Breuer 等が開発したもので、米国における鉄塔サージインピーダンスはこの方法によっており、鉄塔サージインピーダンスとして $150\Omega$ 程度の値が得られているものが多い。反射法は、特に実用鉄塔において実測の行いやすい方法であるが、測定線の変歪特性および反射波全体が明確でなく、塔頂、大地からの反射点も見極めるのがむつかしく、誤差を生じ易くなる。

第1.14図は、透過法によって得られる波形をモデル的に示したもので、上段の波形は、測定線のみの場合について、その片端にステップ波を印加し、他端において測定した電圧波形を示したものであり、下段は測定線の中央に鉄塔頂を接続した場合に得られる電圧波形である。

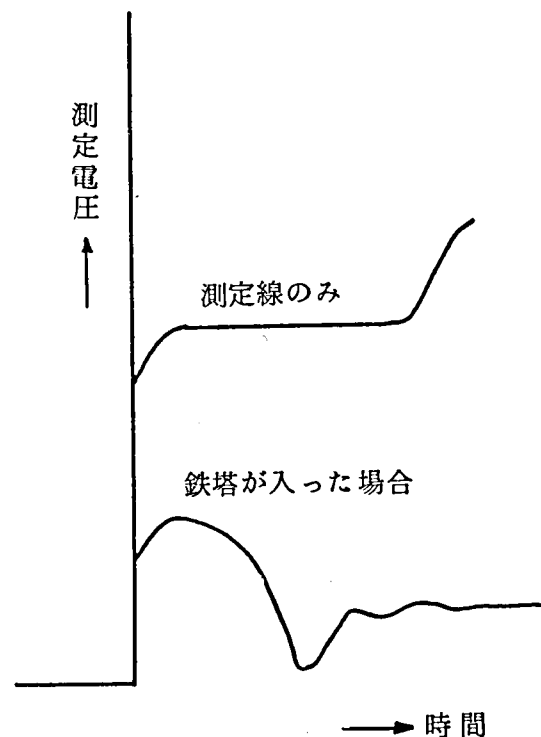
この場合、測定回路は第1.15図のようになるので、鉄塔インピーダンス $Z_T$ は

$$Z_T = \frac{1}{2} \frac{e_r}{(1-e_r)} Z_0 \quad (1.18)$$

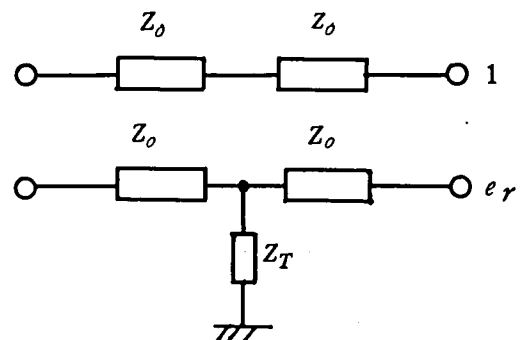
ただし、 $e_r$ は鉄塔を接続した時と外した場合の測定電圧の比

$Z_0$ は測定線のサージインピーダンス

透過法の場合には、鉄塔のない場合、鉄塔を接続した場合にかかわらず、サージは同じ測定線上を伝搬するので、測定端に現れる電圧は両者とも測定線による変歪を同様にうけているはずであるから、(1.18)式は測定線の変歪の補正後の値を示すこと



第1.14図 透過法により得られる電圧波形例



第1.15図 透過法における回路図



になり、反射法の場合よりも信頼性の高い値が得られる。

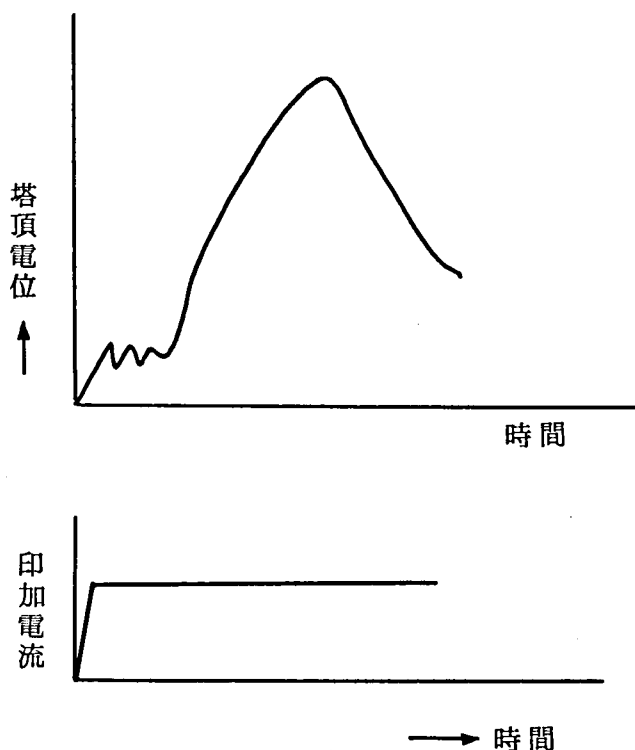
第 1.1 6 図は直接法によって得られる波形をモデル的に示したものである。鉄塔への流入サージ電流は時間に関係なく一定と見なせるので、サージインピーダンス  $Z_T$  は

$$Z_T = \frac{\text{塔頂電位}}{\text{印加電流}} \quad (1.19)$$

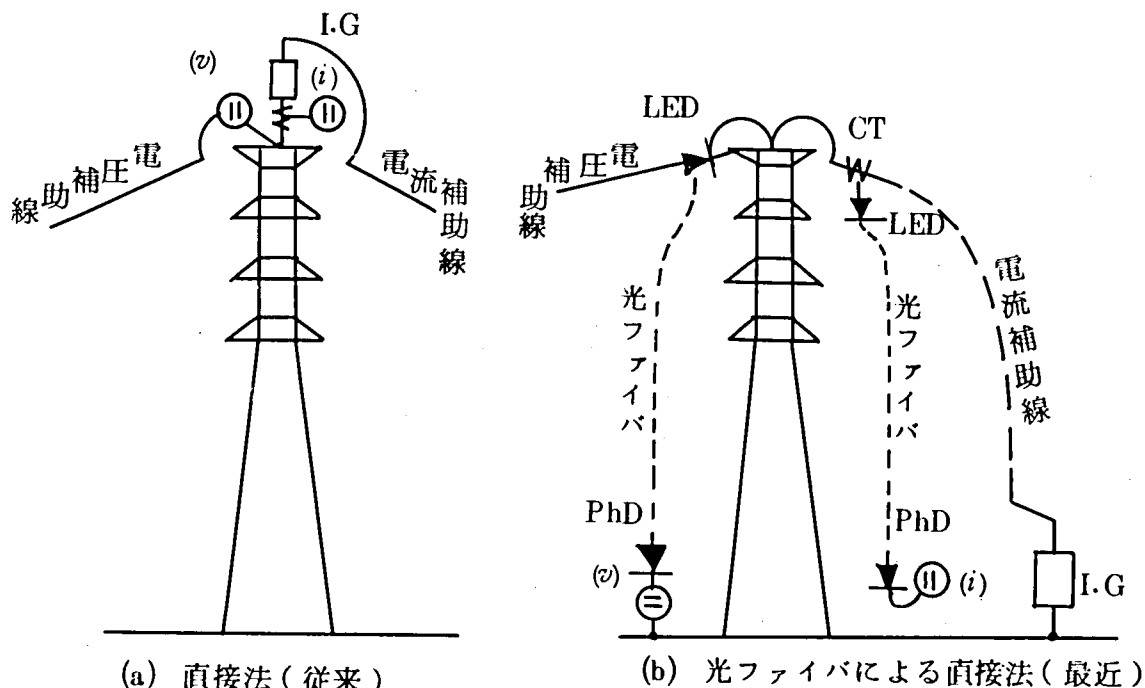
として、測定結果から測定線のサージインピーダンスとは無関係に直ちに求め得ることが大きな特徴である。また、この測定法は、

(1.1 4) 式で表わした電磁界理論による取り扱いに完全に対応しており、その測定結果のもつ意味は前二者と質的に異っており、特に耐雷設計に直接かかわるがい子連両端に生ずる電位差を評価する上では優れた方法である。ただ、実用鉄塔での実測に際しては、インパルス発生器、測定器類をすべて塔頂に設置する必要があるほか、測定者自身も高鉄塔上での作業となるので、相当の足場を要し、これが測定結果に影響を及ぼす懸念があるほか、準備、測定、撤去のすべてが大がかりとなることは否めない。また、インパルス発生器は当然、小形軽量、従って小出力のものとならざるを得ないので、最近のように電界強度の強い放送波が全く休止することなく充満している環境では、この影響のためにしばしば測定不能に陥ることがある。

これらの問題を解決するために、筆者は光ファイバおよび発光素子、光電素子の性能が急速に向上したことに着目して、高周波領域における変換、伝送特性の優れたものを特注<sup>(34)</sup>し、これを用いて地上から直接法によって測定する方法を開発した。第 1.1 7 図(b)は、この概要で、塔頂への電流印加が地上に設置したインパルス発生器から電流補助線を経た後行われる点を除けば、他はすべて同図(a)の従来の直接法と全く同様の回路となる。この場合も、電流補助線に同軸ケーブルを使用することによって(a)図の場合とほぼ同様に波頭部の急峻な波形を印加することができる。<sup>(35)</sup>



第 1.1 6 図 直接法の場合の実測波形例



第 1.17 図 光ファイバを用いた直接法 LED：発光ダイオード  
PhD：フォトダイオード

また、この光学式アナログ信号伝送系は、立ち上がり時間が数  $10 \text{ ns}$  程度の総合特性をもっているほか、印加線、鉄塔との間の相互作用を受けないので、測定結果に何ら影響を及ぼすものではない。

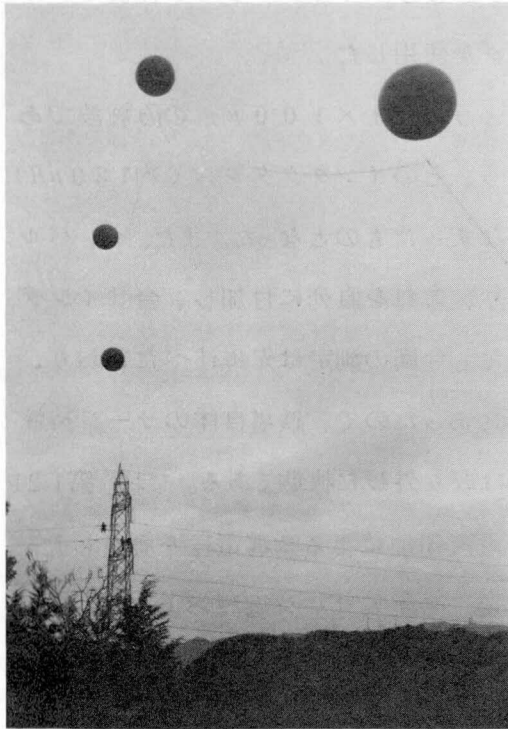
### 1.3.3 光学式アナログ信号伝送系による $35.3 \text{ m}$ 送電鉄塔の雷サージ特性の実測と結果 <sup>(36)</sup>

第 1.18 図は、雷サージ特性の実測を行った  $275 \text{ kV}$  2 回線送電鉄塔の概略形状と寸法で、塔高は  $35.3 \text{ m}$  である。

第 1.19 図は、この実測回路の概要で、電圧印加は鉄塔の塔頂に対して約  $120 \text{ m}$  離れた地点の地上に設置した  $600 \text{ kV}$  インパルス発生器から行った。この測定は、送電線雷撃事故の様相解明の足がかりを得ることが主目的であったので、このような高電圧の発生電源を使用し、印加線は第 1.20 図に示すように数個の気球を用いて吊り下げ、鉄塔上方から印加できるように工夫した。このため、印加線には同軸ケーブルを用いることが不可能となり、 $8 \text{ mm}$  の絶縁電線を使用した。

鉄塔に流入するサージ電流は、光ファイバ、変換素子を用いた光学式伝送系によって、塔頂への流入波形を地上で測定した。また、塔頂の電位は、鉄塔に対しインパルス発生器と反対方向に約  $430 \text{ m}$  離れた点まで遠方接地線を引っ張って接地し、その接地点を基準電位として、電流の場合と同様に光学式伝送系を用いて地上にて測定した。電流、電圧の測

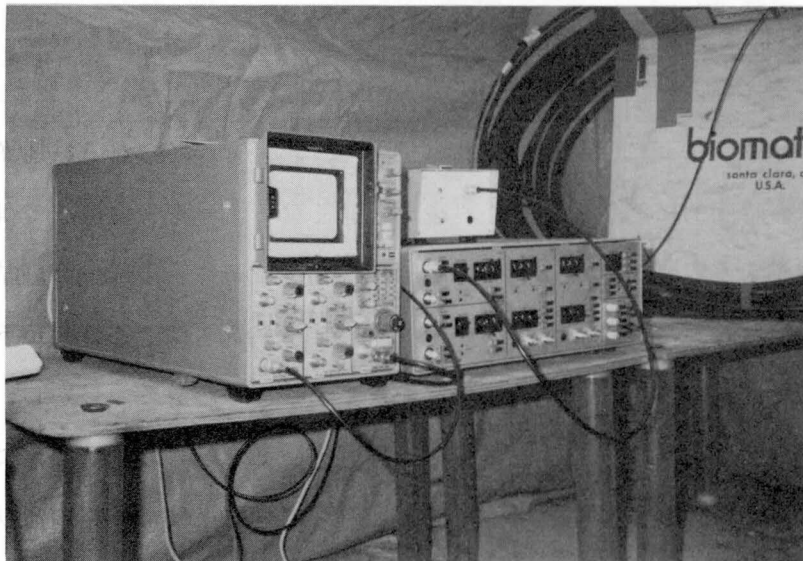




(a) 気球による印加線の吊架状況



(b) 600 kV インパルス発生器



(c) 光ファイバを接続した測定器

## 第 1.20 図 測 定 の 状 況

定器には、200MHzのメモリ付きシンクロスコープおよびバイオメーション社製モデル8100（分解能10ns）のトランジェントレコーダを使用した。

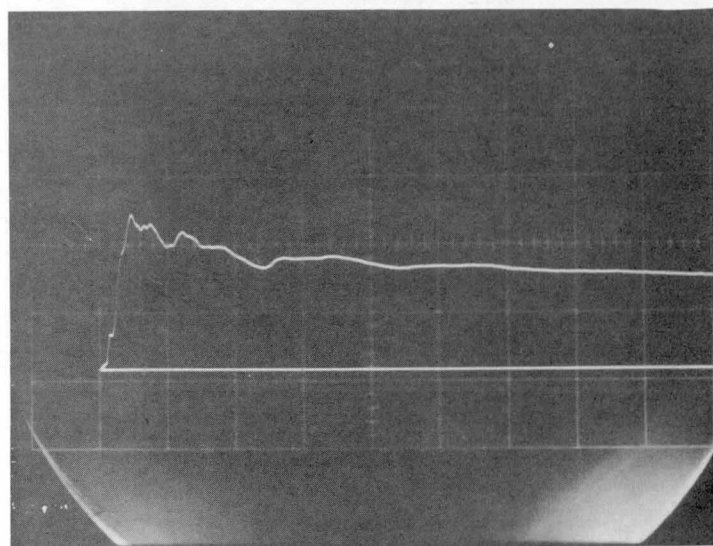
インパルス発生器の発生波形は第1.21図(a)に示すように $0.1 \times 100 \mu s$ の急峻波であるにもかかわらず、今回の測定では印加線の関係から、そのインダクタンス（約130 $\mu H$ ）のために、塔頂への流入サージ電流の波形はかなりなまったものとなった。また、インパルス発生器付属の直列インダクタンス440 $\mu H$ があり、これを直列に付加し、合計インダクタンスを570 $\mu H$ とした場合についても測定した。今回の測定は先に述べたとおり、その主目的が鉄塔のサージインピーダンス測定以外にあったので、鉄塔自体のサージ特性を測定したものは、この2種のみである。架空地線は取り外した状態である。なお、第1.21図(b)は塔頂の電圧測定用端子を塔頂から切り離し、電流印加による誘導電圧を測定した結果であり、また、第1.22図および第1.23図は塔頂への流入サージ電流および塔頂電位について得られたオシログラムの代表例である。これらから、明らかなように、誘導電圧が測定結果に及ぼす影響は5%（ $67V/1,730V=0.04$ ）以下であった。

#### 1.4 鉄塔の雷サージ特性に関する考察

鉄塔の雷サージ特性については、電磁界理論による計算法が発表され、直接法による測定法が確立されたことで原理的には解決されたかのように見える。しかし、実用の鉄塔を対象としてこの両者から得られる具体的数値は必ずしも一致しているとは限らない。以下、サージインピーダンス、伝搬速度それぞれについて考察する。

##### 1.4.1 サージインピーダンスについて

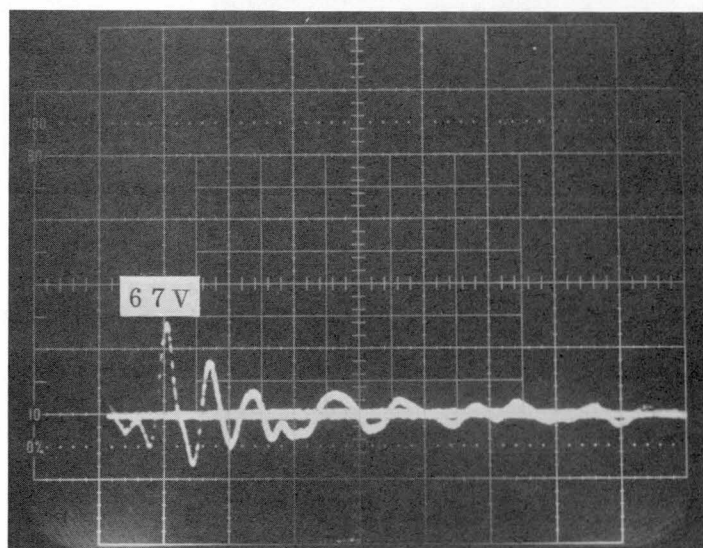
1.3.2で述べたように、反射法または透過法によって得られる鉄塔インピーダンスの実測結果は、時間的に初期部で高く、後部で低くなる。一方、直接法では、第1.2図または第1.1表からも明らかなように、時間的に初期部で低く、後部で高い結果が得られる。この一見、相反した結果は、鉄塔のサージインピーダンスは上部の方が下部より高い、あるいは低いとの議論をよび、混乱を与えてきたように思われる。しかし、この問題は、1.2.4で述べたループ電圧法による電磁界理論を、それぞれの測定回路に適用すれば解明できる。すなわち、電磁界理論によれば、2点間の電位差は積分路の選び方で異なったものとなり、これらの相違は第1.12図(a)(b)(c)に見られる電位差の定義の相違に基づくものであって、鉄塔頂については直接法と同一のサージインピーダンスの時間変化を生じている。しかし、反射法、透過法の場合には、同時に測定線のサージインピーダンスも介在し



$0.5 \mu\text{s}/\text{div}$

$20 \text{ A}/\text{div}$

(a) 600 kV インパルス発生器の発生電流波形



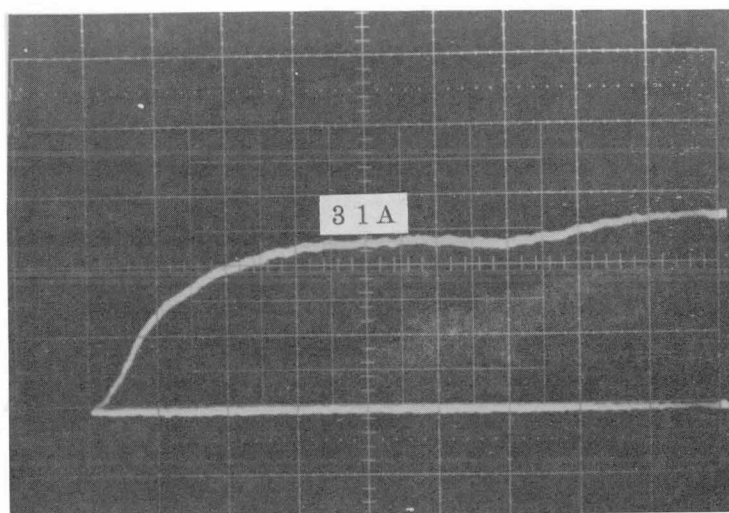
$0.2 \mu\text{s}/\text{div}$

$50 \text{ V}/\text{div}$

(b) 誘導電圧

第 1.21 図 600 kV インパルス発生器の電流波形と  
誘導電圧の波形

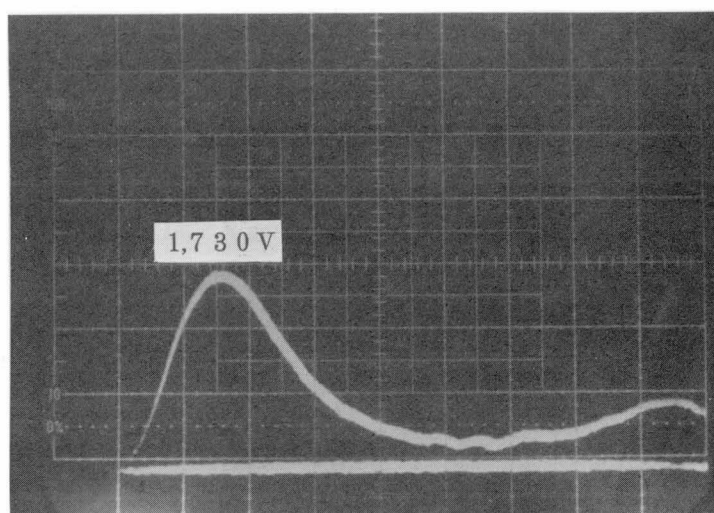




$0.2 \mu\text{s}/\text{div}$

$13 \text{ A}/\text{div}$

(a) サージ電流

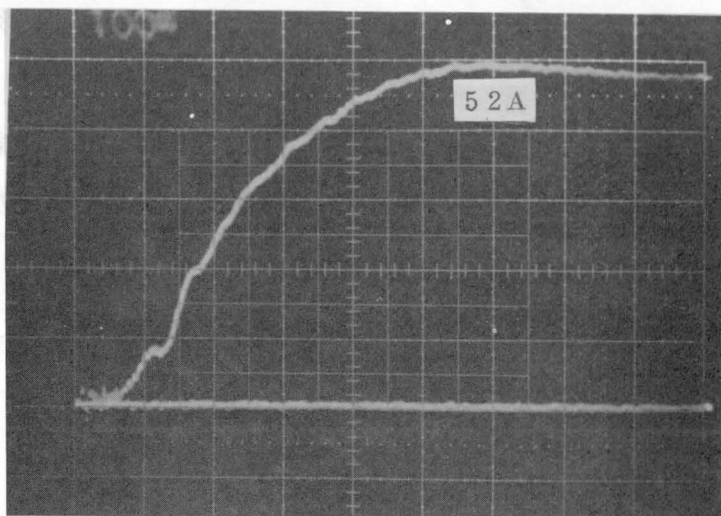


$0.2 \mu\text{s}/\text{div}$

$600 \text{ V}/\text{div}$

(b) 塔頂電位

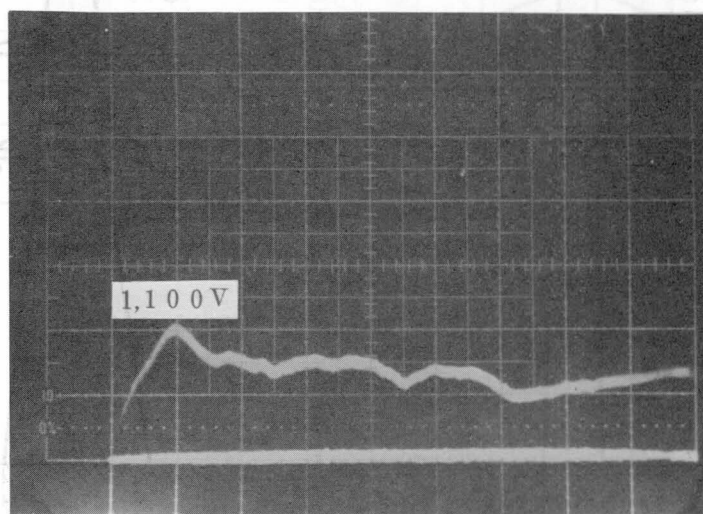
第 1.22 図 印加線 の み の 場 合  
( $L \simeq 130 \mu\text{H}$ ) の実測波形



$0.5 \mu\text{s}/\text{div}$

$10.5 \text{ A}/\text{div}$

(a) サージ電流



$0.5 \mu\text{s}/\text{div}$

$580 \text{ V}/\text{div}$

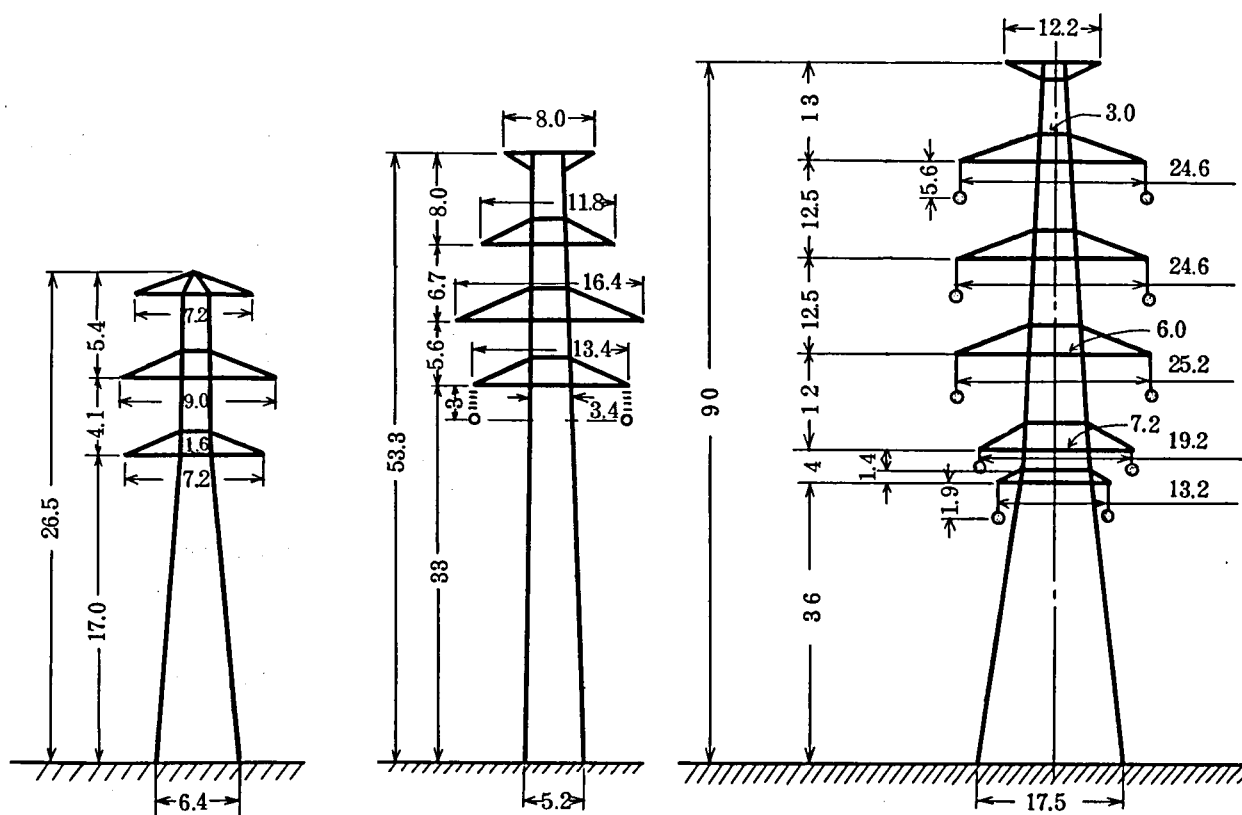
(b) 塔頂電位

第 1.23 図 直列インダクタンス  $440 \mu\text{H}$  を付加した場合  
( $L \simeq 570 \mu\text{H}$ ) の実測波形

ており、1.3.2において述べたように、このサージインピーダンスを基準にして、(1.17)式、または(1.18)式により鉄塔のサージインピーダンスを求めた結果が、これらの場合に得られる鉄塔サージインピーダンスの時間変化となるので、初期部が高く、後部では低い変化として現われることになる。

このように、鉄塔頂のサージインピーダンスは、測定面では直接法により、理論面では1.2.4で述べた電磁界理論に対応して時間変化を生ずることになる。従って、この両者間の対応について具体的に比較検討を行う。

第1.24図～第1.28図は、第1.1図に示した鉄塔に具体的形状と寸法を記入したものである。



第1.24図 26.5m  
鉄塔の形  
状と寸法

主柱部の等価半径

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}(6.4 + 16) = \frac{4}{\sqrt{2}}$$

(単位m)

第1.25図 53.3m鉄  
塔の形状と  
寸法

主柱部の等価半径

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}(5.2 + 3.4) = \frac{4.3}{\sqrt{2}}$$

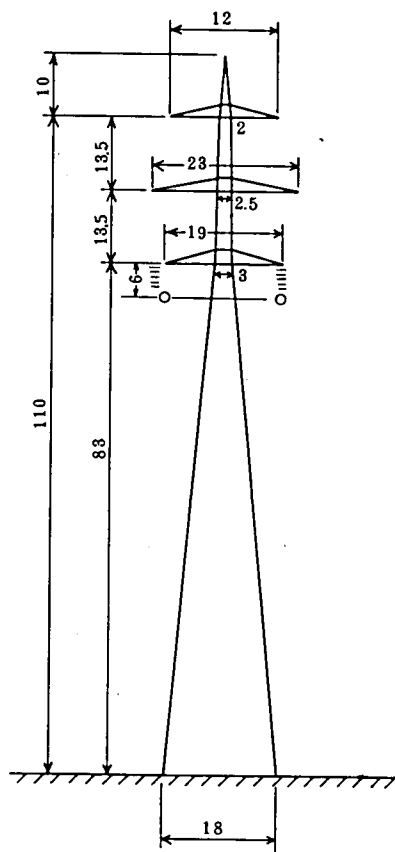
(単位m)

第1.26図 90m鉄塔の  
形状と寸法

主柱部の等価半径

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}(17.5 + 7.2) = \frac{12.4}{\sqrt{2}}$$

(単位m)

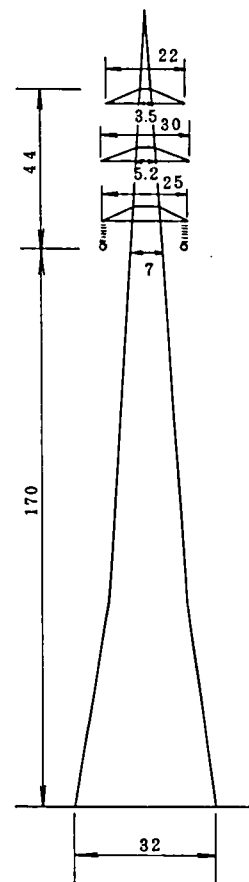


第 1.27 図 110m 鉄塔の形状と寸法

主柱部の等価半径

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}(18+3) = \frac{10.5}{\sqrt{2}}$$

(単位  $m$ )



第 1.28 図 214m 鉄塔の形状と寸法

主柱部の等価半径

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}(32+7) = \frac{19.5}{\sqrt{2}}$$

(単位  $m$ )

いま、これら鉄塔の腕金を除去して、主柱部のみを対象として考察する。すなわち、この主柱部に外接する円の半径の平均値を等価円柱の半径として塔頂からの鉄塔サージインピーダンスを(1.15)式によって求め、これを第1.1表の実測結果と対比すると第1.2表となる。

第 1.2 表 鉄塔を等価円柱とした場合のサージインピーダンス

記号	鉄 塔			サージインピーダンス			仮想半径 ( $m$ )	腕金の平 均長( $m$ )
	回線数	高さ( $m$ )	主 柱 部 等 価 半 径 ( $m$ )	計算値 ( $\Omega$ )	実測値 ( $\Omega$ )	比 率		
(1)	2	2 6.5	$4.0/\sqrt{2}$	1 9 6	1 0 0	1.9 6	1 4.1	7. 8
(2)	2	5 3.3	$4.3/\sqrt{2}$	2 3 4	1 0 0	2.3 4	2 8.5	1 3.9
(3)	4	9 0.0	$12.4/\sqrt{2}$	2 0 1	1 0 5	1.9 1	4 4.6	2 4.8
(4)	2	1 1 0.0	$10.5/\sqrt{2}$	2 2 4	1 0 8	2.0 7	5 1.4	1 8.0
(5)	2	2 1 4.0	$19.5/\sqrt{2}$	2 2 7	1 0 5	2.1 6	1 0 4.7	2 5.7

〔注〕 仮想半径は、実測より求めたサージインピーダンスに合致するような等価円柱の半径

この表によれば、計算値の方が実測値の約 2 倍高くなっている。

この原因としては、計算式は ( 1.1 ) 式～ ( 1.1 5 ) 式のすべての計算式が、支柱部のみを対象とした垂直等価円柱としていることにあることが考えられる。すなわち、鉄塔上部に存在する腕金部の影響が全く考慮されていない。この点については、Jordan 以来ほとんどの関係者がその修正の必要性をも含めて認めているところである。

腕金部の影響を考慮した計算法を最も簡単に求める方法は、等価円柱の半径を大きくすることである。この観点から、実測より求めたサージインピーダンスに合致するような等価円柱の半径を仮想半径とよぶこととし、これを逆算した。この仮想半径が支柱部等価半径と腕金平均長の  $1/2$  の中間にあれば、その等価性を追究することに意味がでてくるはずである。ところが、第 1.2 表の仮想半径欄に示すように、腕金平均長の  $1/2$  の 3.6～7.8 倍を半径とする巨大な円柱を想定せざるを得なくなり、この仮想半径については実鉄塔との等価性が失われることになる。

従って、別途の考察が必要になってくる。

#### 1.4.2 伝搬速度について

直接法による実測結果から得られる鉄塔におけるサージの伝搬速度が光速の 70～80 % 程度であることは第 1.1 表において示した。さて、サージ電流は数 MHz 程度の高周波電流成分がほとんどであるから、表皮効果のため鉄塔の表面を伝搬することになり、鉄塔

の比透磁率の影響がない。従って、鉄塔におけるサージ伝搬は、比誘電率が1の大気中にある非磁性導体におけるサージ伝搬と同様になるので、その伝搬速度は光速に等しいはずである。実測による伝搬速度が光のそれより遅れる点については、実際には大地が完全導体でないため、負の反射波の発生点は地表ではなく大地中であると考えられている。この場合、負の反射波を生ずる大地中の相当大地面深さを求めると

$$\text{鉄塔地上高の} (25 \sim 43) \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} (\%) \quad (1.20)$$

となり、一般に大地中においては、 $\mu \simeq 1$ 、 $\epsilon \simeq 30 \sim 100$ であるから、これを代入すれば鉄塔地上高の3～8(%)と十分現実性のある値となる。

しかし、一方、サージインピーダンスを求める式は、鉄塔におけるサージの伝搬速度を光速としているので、この相当大地面深さを考慮すれば、さらに高い値となり、ますます実測結果とかけ離れることになる。また、スケールモデル鉄塔による実験では、床に銅板を敷き詰め、完全導体として大地を模擬することになるが、伝搬速度は実用鉄塔における実測値と同じになったとの報告<sup>(37)</sup>もある。

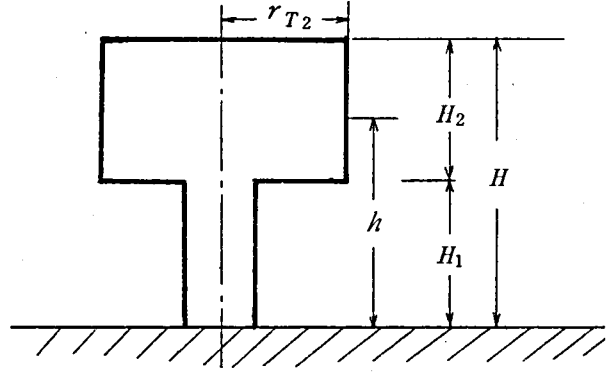
以上のとおり、光速であるべきはずの鉄塔におけるサージの伝搬速度が光速の70～80%と遅れる理由についても理論的に解明されているとはいえず、特に、サージインピーダンスと併せて考えると、鉄塔を単一の円柱状導体と見なすことは、理論と実測結果がますます一致し難くなる傾向になる。

## 1.5 鉄塔の等価モデルと鉄塔サージインピーダンスの表現法

前節で述べた考察結果から、鉄塔を単一の円柱状導体と見なすことは不適当であって、腕金部の存在を考慮したものとする必要のあることが明らかになった。腕金部に対する研究としては、川合氏<sup>(38)</sup>および山田氏<sup>(39)</sup>の論文があるが、これらをそのままこの論文において対象としている変電所の耐雷設計に必要な計算回路に組み込むことは煩雑に過ぎて不可能に近い。この論文の目的とするところからは、計算上の制約もあり、鉄塔モデルとしては、上下2段積み程度の簡単なものにとどめる必要がある。従って、鉄塔モデルとしては、鉄塔を下相腕金の取付部付近から上方の腕金が存在する上部と、それより以下の下部に分けた2段積みモデルを考え、上部については、腕金の平均長を等価直径とする円柱とし、下部は、その断面の外接円を等価直径とする円柱からなる垂直2段積み導体として検討することにした。

この場合、上部のサージインピーダンス $Z_{Tu}$ は次のようにして求めることができる。

第 1.2 9 図に示すように、鉄塔高さを  $H$ 、下部の高さを  $H_1$ 、上部の長さを  $H_2$ 、上部の等価半径を  $r_{T2}$  とし、上部の任意の地上高を  $h$  とすると、1.2.2 に述べたところから、上部のインダクタンス  $L_{Tu}$ 、キャパシタンス  $C_{Tu}$  はそれぞれ次式で表わされる。



第 1.2 9 図 2 段積み円柱モデル概念図

$$L_{Tu} = \int_{H_1}^H \frac{\mu_0}{2\pi} \ell n \frac{2h}{r_{T2}} dh = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ h \cdot \ell n \frac{2h}{r_{T2}} - h \right]_{H_1}^H$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ H \ell n \frac{2H}{r_{T2}} - H_1 \ell n \frac{2H_1}{r_{T2}} - H_2 \right] \quad (1.21)$$

$$C_{Tu} = \int_{H_1}^H \frac{2\pi\epsilon_0}{\ell n \frac{2h}{r_{T2}}} dh \quad (1.22)$$

しかるに、 $\frac{1}{\ell n x}$  は  $x$  の範囲があまり大きくない場合には、その範囲内においては

$$\frac{1}{\ell n x} \simeq \frac{n_1}{x-1} + n_2 \quad n_1, n_2 : \text{定数} \quad (1.23)$$

によって、よい近似を示すことから (1.22) 式は次の (1.24) 式になる。

$$C_{Tu} \simeq 2\pi\epsilon_0 \int_{H_1}^H \left[ \frac{\frac{n_1}{\frac{2h}{r_{T2}} - 1} + n_2}{\frac{2h}{r_{T2}} - 1} \right] dh$$

$$= 2\pi\epsilon_0 \left[ \frac{n_1}{2} \cdot r_{T2} \cdot \ell n \left( \frac{2h}{r_{T2}} - 1 \right) + n_2 h \right]_{H_1}^H$$

$$= 2\pi\epsilon_0 \left[ \frac{n_1}{2} \cdot r_{T2} \cdot \ell n \frac{2H - r_{T2}}{2H_1 - r_{T2}} + n_2 H_2 \right] \quad (1.24)$$

$$\therefore Z'_{Tu} = \sqrt{\frac{L_{Tu}}{C_{Tu}}} = 60 \left[ \frac{H \ell n \frac{2H}{r_{T2}} - H_1 \ell n \frac{2H_1}{r_{T2}} - H_2}{\frac{n_1}{2} \cdot r_{T2} \cdot \ell n \frac{2H - r_{T2}}{2H_1 - r_{T2}} + n_2 H_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.25)$$

実際には、1.4.1で述べたところの他、腕金部においては透過、反射が行われ、これらによる減衰があり、<sup>(38)</sup>この減衰係数を $\kappa_{Tu}$ とすれば求むる $Z_{Tu}$ は次式となる。

$$Z_{Tu} = \kappa_{Tu} \cdot Z'_{Tu} \quad (1.26)$$

次に、下部のサージインピーダンス $Z_{Te}$ は、下部の等価半径を $r_{T1}$ とすれば(1.2)式から

$$Z'_{Te} = 60 \log \frac{2H_1}{r_{T1}} \quad (40), (41) \quad (1.27)$$

この場合も1.4.1で述べたところから導入した係数を $\kappa_{Te}$  ( $0 < \kappa_{Te} < 1$ )とすれば、 $Z_{Te}$ は(1.28)で表わされる。

$$Z_{Te} = \kappa_{Te} \cdot Z'_{Te} \quad (1.28)$$

さきに述べた26.5mから214mまでの鉄塔について、 $r_{T2}$ として腕金平均長の $1/2$ をとり、 $\kappa_{Tu} = 0.5$ として(1.26)式から $Z_{Tu}$ を、また、 $r_{T1}$ として、下相腕金取付部における支柱の等価半径をとり、 $\kappa_{Te} \simeq 1$ として(1.28)式から $Z_{Te}$ を求めると第1.3表となる。

第 1.3 表  $Z_{Tu}$  ,  $Z_{Te}$  の値

記号	$H(m)$	$H_1(m)$	$H_2(m)$	$2r_{T2}(m)$	$n_1$	$n_2$	$Z'_{Tu}(\Omega)$	$Z_{Tu}(\Omega)$ ( $\kappa_{Tu}=0.5$ )	$r_{T1}(m)$	$Z_{Te}(\Omega)$ ( $\kappa_{Te} \simeq 1$ )
(1)	26.5	17.0	9.5	7.8	1.60	0.25	145	73	$1.6/\sqrt{2}$	204
(2)	53.3	33.0	20.3	13.9	1.46	0.27	150	75	$3.4/\sqrt{2}$	199
(3)	90.0	52.0	38.0	24.8	1.64	0.25	146	73	$6/\sqrt{2}$	192
(4)	110.0	83.0	27.0	18.0	2.04	0.22	185	93	$3/\sqrt{2}$	262
(5)	214.0	170.0	44.0	25.7	2.40	0.22	201	101	$7/\sqrt{2}$	254
(6)	35.3	20.0	15.3	10.5	1.56	0.25	142	71	$2.2/\sqrt{2}$	195

第1.3表によれば、 $Z_{Tu} < Z_{Te}$  <sup>(42)</sup>となり、このモデルから得られる鉄塔のサージインピーダンスは、単一の垂直円柱モデルから得られる値よりはるかに小さく、実測結果に近づくことが期待されるほか、伝搬速度についても、実測から得られる速度を見掛けの伝搬速度と見なし、鉄塔におけるサージの伝搬速度を光速に等しいとすると、 $Z_{Tu}$ と $Z_{Te}$ の接点と塔頂の間で正の反射を繰り返すので、塔脚からの負の反射波が塔頂に達するまでに塔頂電位の上昇



率が高くなり、塔脚からの負の反射波が塔頂に達してもすぐには塔頂電位の低下があらわれず、塔頂電位が低下しはじめるまでの時間が長くなり、見掛けの伝搬速度が光速より遅くなるものと解することができる。

以上述べたところから、この論文では、鉄塔のサージインピーダンスを  $Z_{Tu}$  と  $Z_{Te}$  によって表現し、鉄塔におけるサージの伝搬速度は光速に等しいとして解析に用いることにした。

## 第2章 がい子装置のホーンギャップのV-t特性および ZnO避雷器の演算上の表現

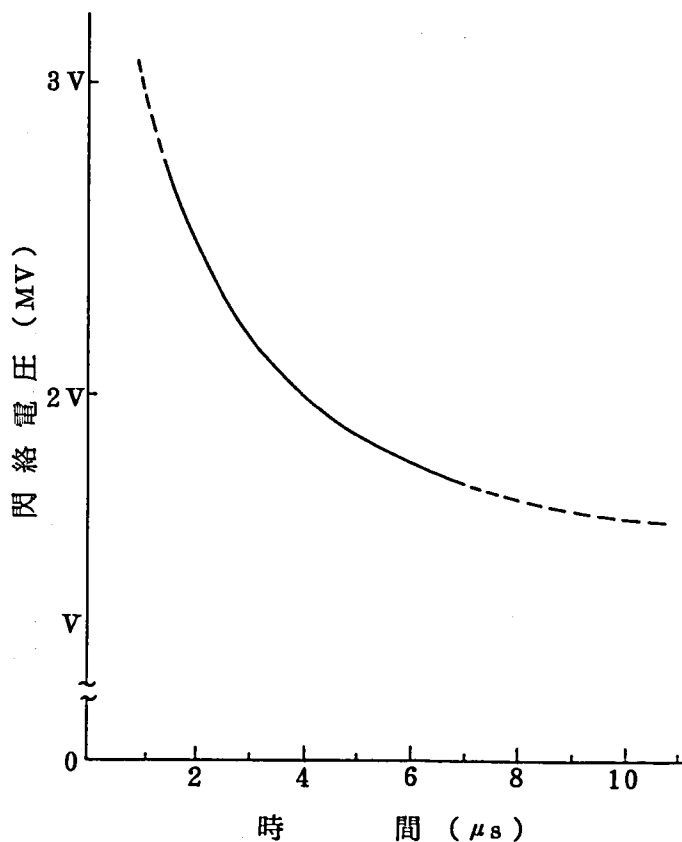
### 2.1 がい子装置のホーンギャップのV-t特性の表現法

送電線の雷害事故は、周知のとおり、ほとんどががい子装置に設けられたホーンギャップの閃絡によって発生する。従って、雷サージ計算をEMTPで行う場合には、このホーンギャップのV-t特性を忠実に表現することが重要である。

一般に、ホーンギャップのV-t特性は、実測により求められるが、その特性は第2.1図に示すとおりである。今回用いたEMTPでは、この図のごときV-t特性を計算回路に直接組み入れることはできない。そこで、筆者は一定の電圧で閉極するスイッチ機能の組み合わせで、閃絡現象を模擬できることに着目して、以下に述べるような方法により、ホーンギャップのV-t特性を表現することにした。

第2.1図によると、波頭長 $1\mu\text{s}$ 以下の立ち上りが急峻な印加波に対するホーンギャップの閃絡電圧は、波頭長 $10\mu\text{s}$ 程度の立ち上りが比較的緩やかな印加波に対するものの約3倍になっているので、ホーンギャップを第2.2図のごとくCR素子で構成される2組の直列回路を逆向きに並列し、一定の閃絡電圧 $V_g$ をもつ3個のギャップ $G_1, G_2, G_3$ を図示のように結線して表現すると、端子ABに非常に急峻な電圧が印加された場合には、Cは分圧に寄与しないので3つのギャップは等しく分圧され、印加電圧が $3V_g$ に達すると同時に閃絡する。なお、3個のギャップにはいずれも時間遅れはない。

次に端子ABに非常にゆるやかな電圧が印加されると電圧は主にCに加わるので、AB端の電圧が $V_g$ のとき3つのギャップにもほぼ等しい電圧 $V_g$ が加わり、3つのギャップは閃絡する。



第2.1図 ホーンギャップのV-t特性の例

印加電圧が中間的な峻度をもつときは、その峻度に応じ  $V_g$  から  $3 V_g$  の間の閃絡電圧をもつので、第 2.2 図の回路はホーンギャップと類似の第 2.3 図に示す  $V-t$  特性となり、各ギャップの閃絡電圧  $V_g$  および  $R$ 、 $C$  の値を適当に選ぶことにより精度よくホーンギャップの  $V-t$  特性を表現できることになる。

なお、 $R$ 、 $C$  の値については、次のようにして求めることができる。  
いま第 2.2 図において  $A B$  端に

$$v(t) = K \cdot t$$

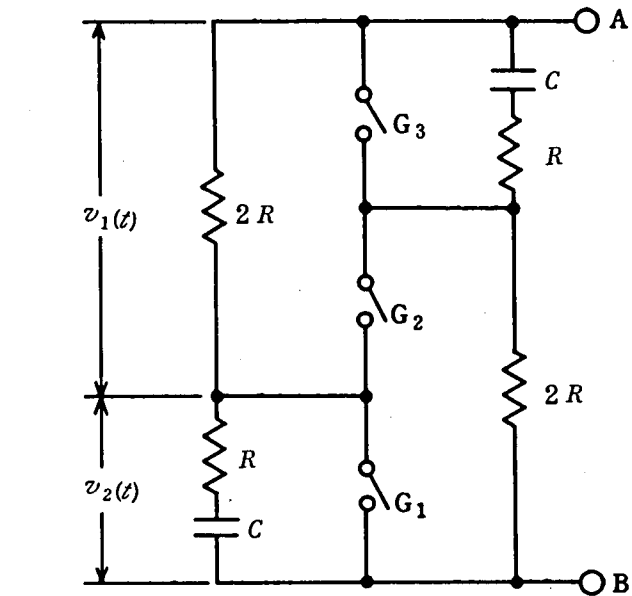
(  $K$  : 波頭峻度  $\text{Mv}/\mu\text{s}$  )

( 2.1 )

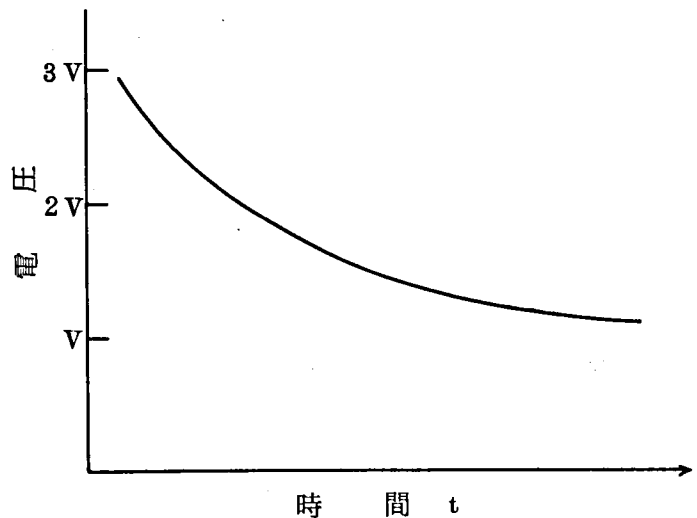
で表わされるランプ電圧を印加した場合を考えると

$$\left. \begin{aligned} 3R \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} &= K \\ v_1(t) &= 2Ri \\ v_2(t) &= Kt - 2Ri \end{aligned} \right\}$$

( 2.2 )



第 2.2 図 ホーンギャップの特性模擬回路



第 2.3 図 模擬回路の  $V-t$  特性

これを解いて、 $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$  を求めると

$$\left. \begin{aligned} v_1(t) &= 2K \cdot RC \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{3RC}} \right\} \\ v_2(t) &= K \cdot t - 2KRC \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{3RC}} \right\} \end{aligned} \right\}$$

( 2.3 )

有限の波頭峻度  $K$  に対して  $v_2$  は常に印加電圧  $v$  の  $1/3$  以上となるから、 $v_2(t) = V_g$  がギャップの閃絡条件となり、波頭峻度  $K$  ( $\text{MV}/\mu\text{s}$ ) と閃絡時間  $t$  との関係は

$$V_g = Kt - 2KRC \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{3RC}} \right\} \quad (2.4)$$

となるので、第 2.1 図の  $V-t$  特性から任意の  $K$  に対する閃絡時間  $t$  を求め、 $V_g$  をこのホーンギャップの直流閃絡電圧と置くことにより積  $RC$  を求めることができる。 $R$  の値は少なくとも送電線路のサージインピーダンスに対して十分大きく選ぶ必要があるので、例えば  $R = 0.5 \text{ M}\Omega$  とすれば、 $C = RC / 0.5 \text{ pF}$  として、 $R$ 、 $C$  個々の値を定めることができる。

実際に、EMTP に組み込む場合には、3 個のギャップをその直流閃絡電圧で閉極するスイッチで表わし、また、ホーンギャップ放電時のインダクタンスをこれらのスイッチ間に直列に分割して挿入することにした。

この方法が実用上十分な精度をもつことについては、4.2.2 において UHV 級ホーンギャップを具体例として示した。

## 2.2 ZnO 避雷器の制限電圧特性と時間効果

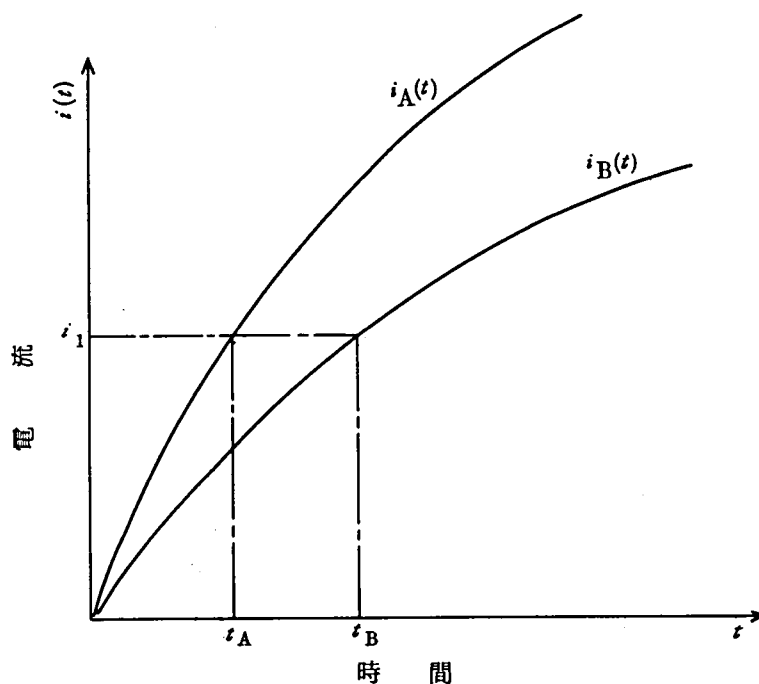
一般に、避雷器の特性要素に用いられる非直線抵抗素子の  $V-I$  特性は雷サージ電流の波頭峻度によって大幅に変化する（これを時間効果と呼ぶこととする。）ことが知られている<sup>(43)</sup>が、従来形の避雷器の場合には、立ち上りが急峻なサージ電流に対する保護レベルは直列ギャップの放電特性によって支配されることから、使用されている SiC 素子自体の  $V-I$  特性の時間効果は ZnO 素子のそれより大きいにもかかわらず、ほとんど問題にならず無視しても差し支えなかった。<sup>(44)</sup>

しかし、ZnO 避雷器の場合には、直列ギャップがないので、そのサージ保護特性が ZnO 素子の  $V-I$  特性のみによって決定されることが最大の特長となっているため、時間効果について十分検討しておくことが必要である。

## 2.3 EMTP における ZnO 避雷器の時間効果を考慮した計算法

ZnO 素子の  $V-I$  特性が時間効果をもつということは、例えば、第 2.4 図の  $i_A(t)$ 、 $i_B(t)$  のように立ち上り峻度の異なる電流が ZnO 素子に流れた場合、与えられた電流  $i_1$  に対する制限電圧は波頭峻度の厳しい  $i_A(t)$  に対するものの方が  $i_B(t)$  に対するものより高い値になり、制限電圧と電流値の関係を一義的に定義できないということであるが、 $i(t)$  の時間変化が第 2.4 図

のように単調に時間  $t$  とともに増加する場合には、時間効果を含んだ制限電圧  $V_r(t)$  と  $i(t)$  の関係は近似的に次式で与えられるとされている。<sup>(45)</sup>



第 2.4 図 ZnO 避雷器の時間効果の概念図

$$i(t) =$$

$$I_L \left[ 1 - \exp \left\{ -F \{ V_r(t) \} t^a \right\} \right]$$

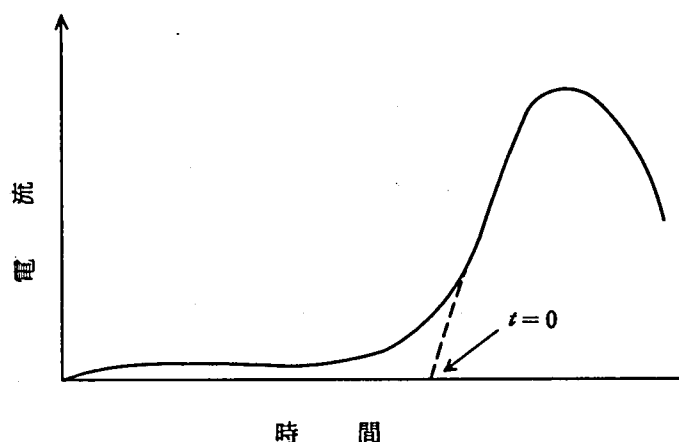
( 2.5 )

ここに

$$\left. \begin{aligned} F \{ V_r(t) \} &= b \left\{ \frac{V_r(t) / L_z - E_o}{E_o} \right\}^c \\ I_L &= K_o \cdot S_z \frac{V_r(t)}{L_z} \left\{ \frac{V_r(t) / L_z - E_o}{E_o} \right\}^m \end{aligned} \right\} \quad ( 2.6 )$$

で、 $K_o$ 、 $E_o$ 、 $m$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は ZnO 抵抗体素材に固有の定数、 $S_z$  および  $L_z$  は ZnO 素子の断面積および積上げ高さである。〔付録-2〕

EMTP<sup>(46)</sup>には TACS (Transient Analysis of Control System-付録-1) と呼ばれる電気回路と制御回路を結びつけるために開発されたプログラムがあり、時々刻々の計算ステップにおいて電気回路の節点電位、枝電流等の値を制御回路に入力し、これらの値を演算処理した出力の値を次の計算ステップにおいて電気回路中の



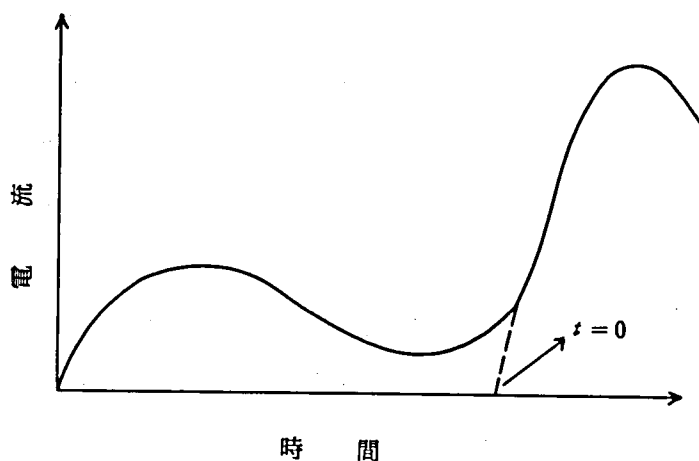
(a) 長いすそ野を持つ電流波形の場合

電圧源や電流源の値として使用できるようにしている。

(2.5)式によると、時間効果を考慮したZnO避雷器は任意の時刻 $t$ に対し $V_r(t)$ が与えられると、電流源として表わせることになるので、TACSを用い、電気回路の節点電位および時間を制御回路に入力して電流を計算し、電気回路の電流源が

(2.5)式になるようにして、時間効果を考慮したZnO避雷器を表現することにした。

ただし、TACSでは時間 $t$ はZnO避雷器に電流が流れはじめるときを0とする必要があるので、第2.5図(a)のように電流波形が長いすそ野をもつ場合や、同図(b)のように2つのピークをもつ電流波形について第2ピーク近傍で $V_r(t)$ と $i(t)$ の関係を求める場合には、図中に示したように仮の時間の零点を設定し、電流が時間と共に単調に増加するものと近似して計算することになる。

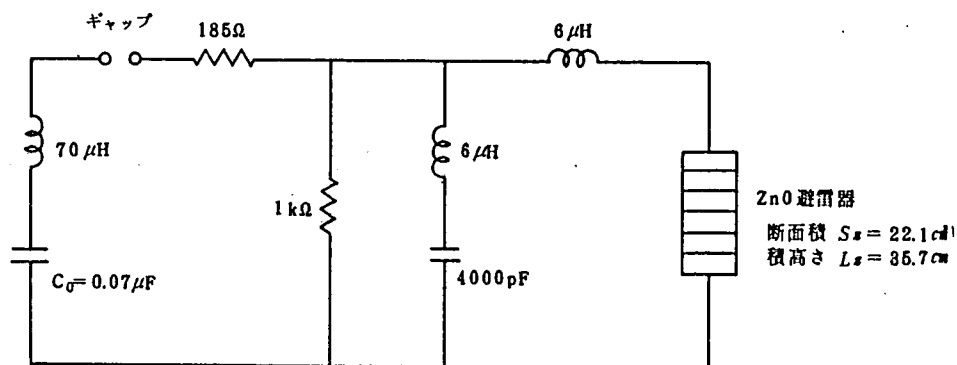


(b) 2つのピークを持つ電流波形の第2ピークの場合

第2.5図 ZnO避雷器の時間効果を考慮する場合における $t=0$ のとり方

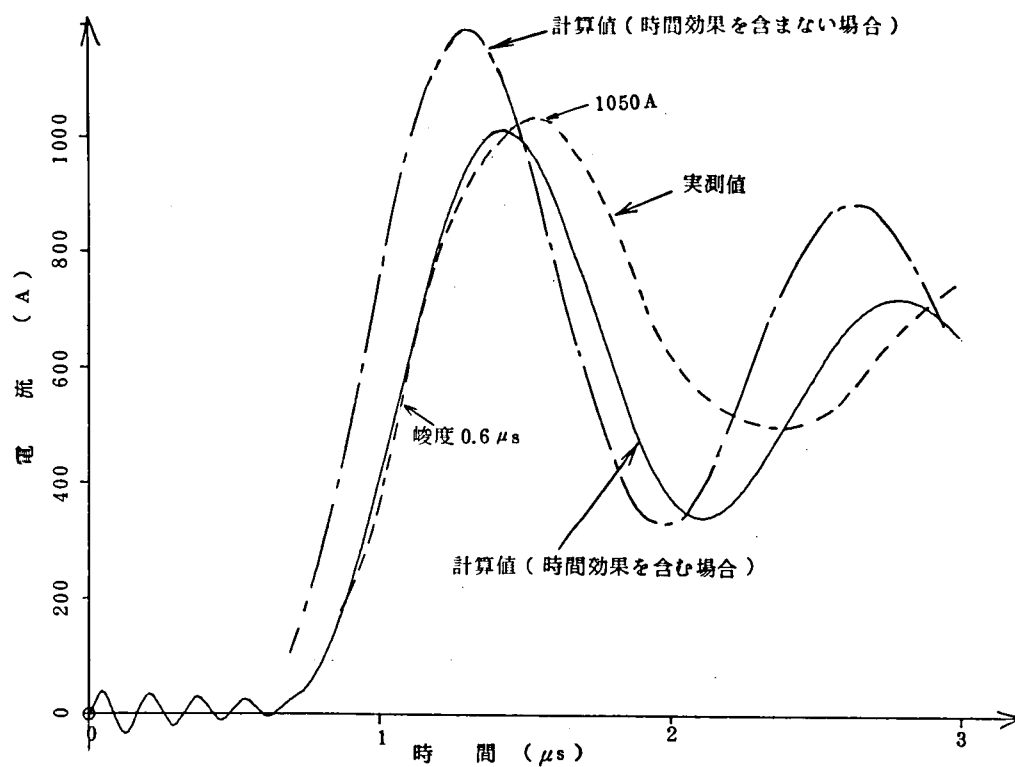
## 2.4 ZnO避雷器のTACSによる計算法の検証と表現法

前節で述べた時間効果を考慮したZnO避雷器の取り扱い法の妥当性を調べるために、代表的なZnO素子のV-I特性を第2.6図に示す回路を用いて実験的に調べ、これをTACSによる解析結果と比較した。

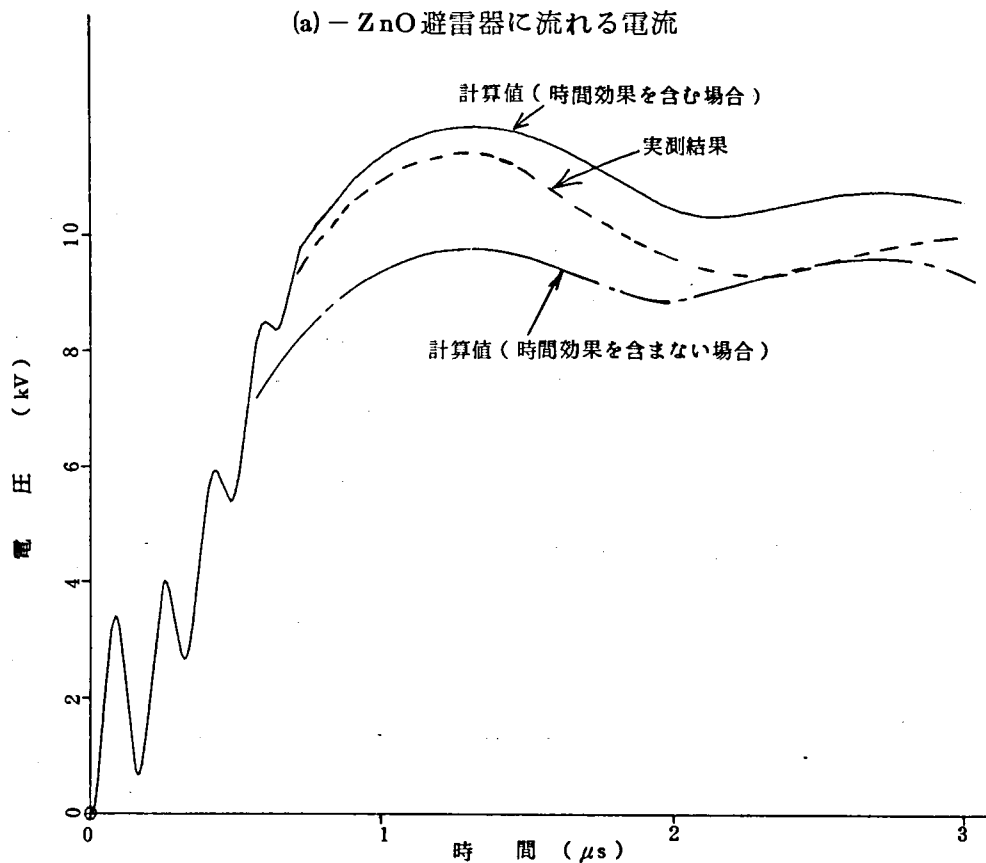


第2.6図 ZnO避雷器の時間効果の実測回路

試料としては、ZnO素子の(2.6)式における定数 $K_o$ 、 $E_o$ 、 $m$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ の値が、現在500 kV以下のZnO避雷器に用いられている素子を複数個並列に接続してUHV用として適用可能な特性としたときに得られる値である $K_o = 0.31$ 、 $E_o = 2111$ 、 $m = 2.29$ 、 $a = 0.81$ 、 $b = 0.34$ 、 $c = 0.99$ で与えられるものを $S_z = 22.1 \text{ cm}^2$ 、 $L_z = 35.7 \text{ cm}$ に積層し、これを通して第2.6図に示すコンデンサ $C_o$ に充電された電荷を放電し、このときのZnO素子の端子電圧と電流値の関係を調べた。第2.7図および第2.8図は $C_o$ の充電電圧をかえて、試料にそれぞれ1050 Aおよび2920 Aのいずれも波頭長 $0.6 \mu\text{s}$ と立ち上り峻度が鋭い電流を流したときの電流波形〔同図(a)〕および電圧波形〔同図(b)〕を示したものである。これらの図によると、このようにサージ電流の峻度が鋭い場合には、時間効果を考慮した計算結果(実線)の方が、時間効果を考慮しない結果(一点鎖線)よりも実測波形(点線)に近く、また安全側の結果を与えるので、前節で述べた(2.5)式、(2.6)式とTACSを用いた解析法によることが妥当であることを示している。しかし、後の4.5.6および5.5.1の具体例において述べるように、変電所内に設置されたZnO避雷器のように、直列回路のインダクタンスや並列回路のキャパシタンスにより避雷器に流れるサージ電流の峻度が緩くなる場合には、時間効果を考慮しないで計算を行っても実用上の差し支えはない。



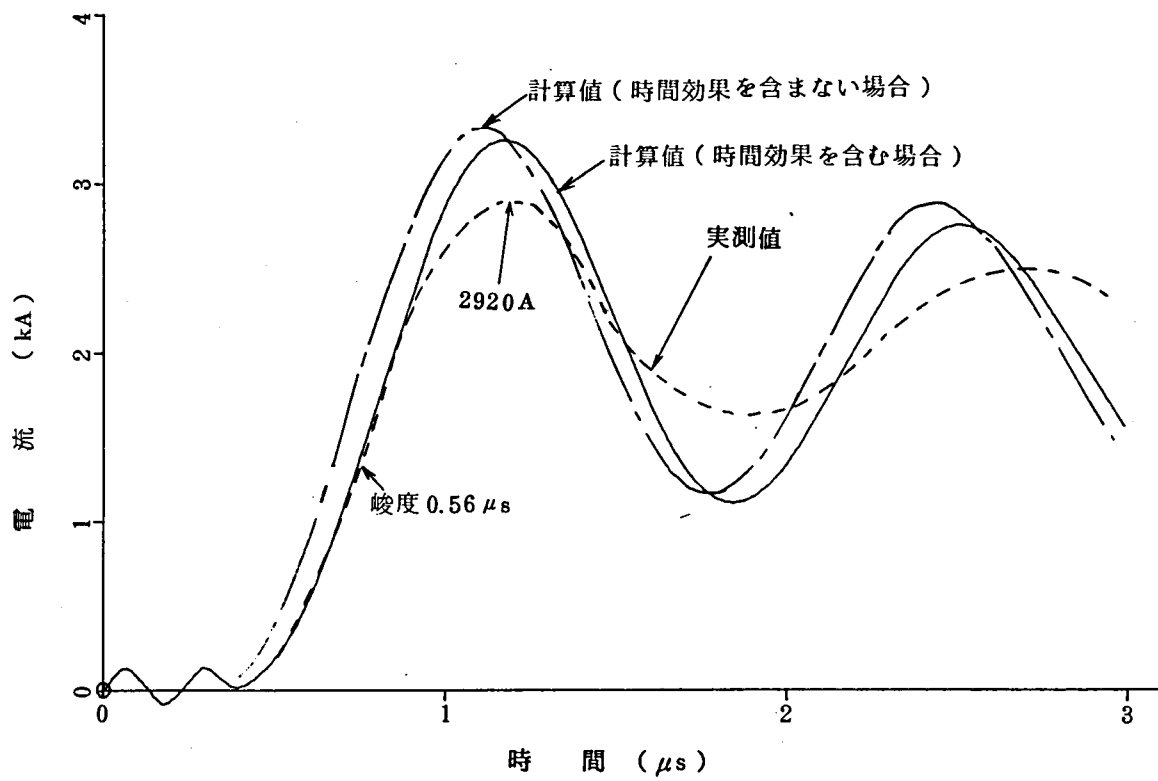
(a) - ZnO 避雷器に流れる電流



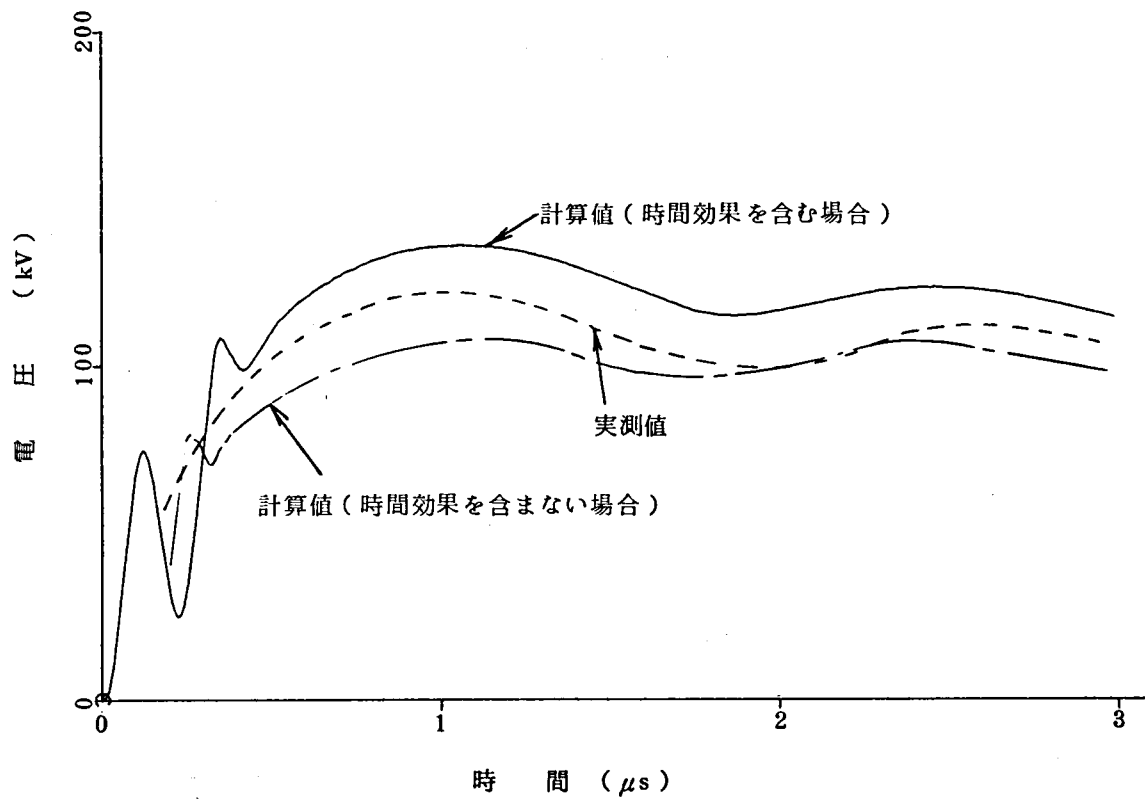
(b) - ZnO 避雷器の端子電圧

第 2.7 図 ZnO 避雷器に対する実測値と計算値の比較 (充電電圧 252 kV)





(a) - ZnO 避雷器に流れる電流



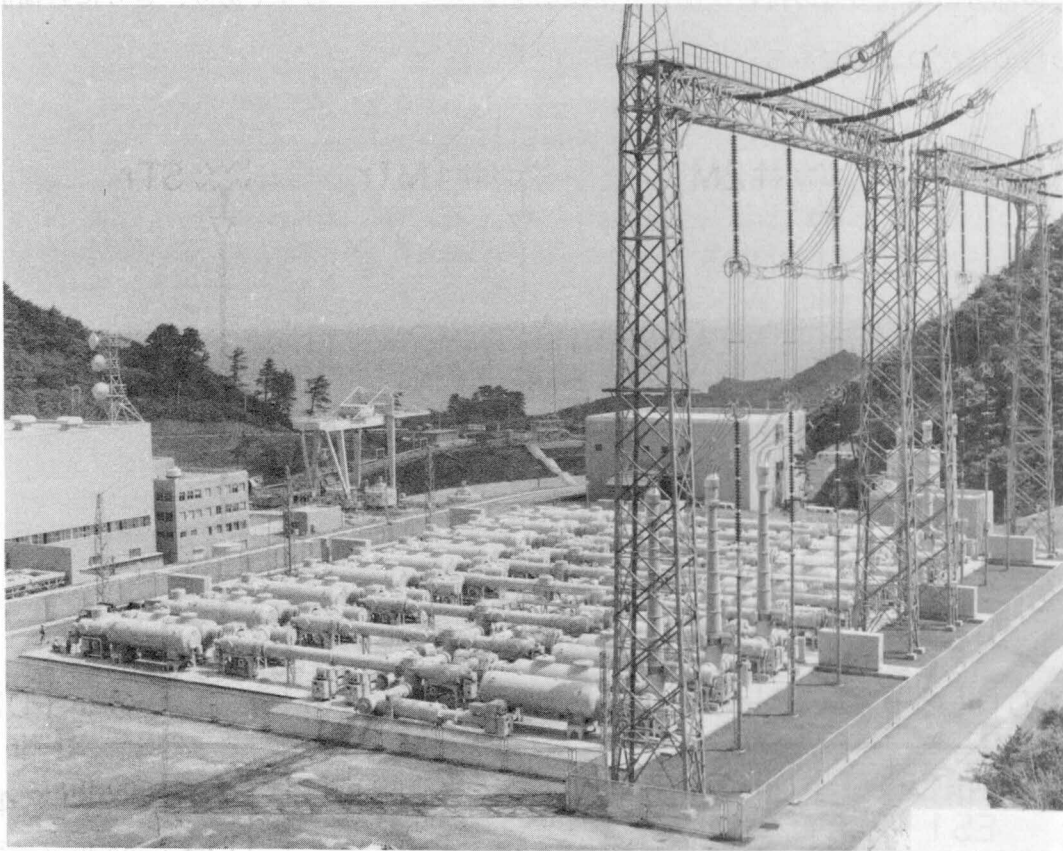
(b) - ZnO 避雷器の端子電圧

第 2.8 図 ZnO 避雷器に対する実測値と計算値の比較 (充電電圧 560 kV)

### 第3章 GISの雷サージ特性とその表現法

#### 3.1 500kV GISにおける雷サージ特性の実測<sup>(47)</sup>

昭和51年に第3.1図に示す世界最初の500kV GISが完成したのを機会に、そのサージインピーダンス、伝搬速度、サージ電圧分布等雷サージ特性全般に関する詳細な実測を行った。



第3.1図 500kV GIS 全景

以下は、その概要である。

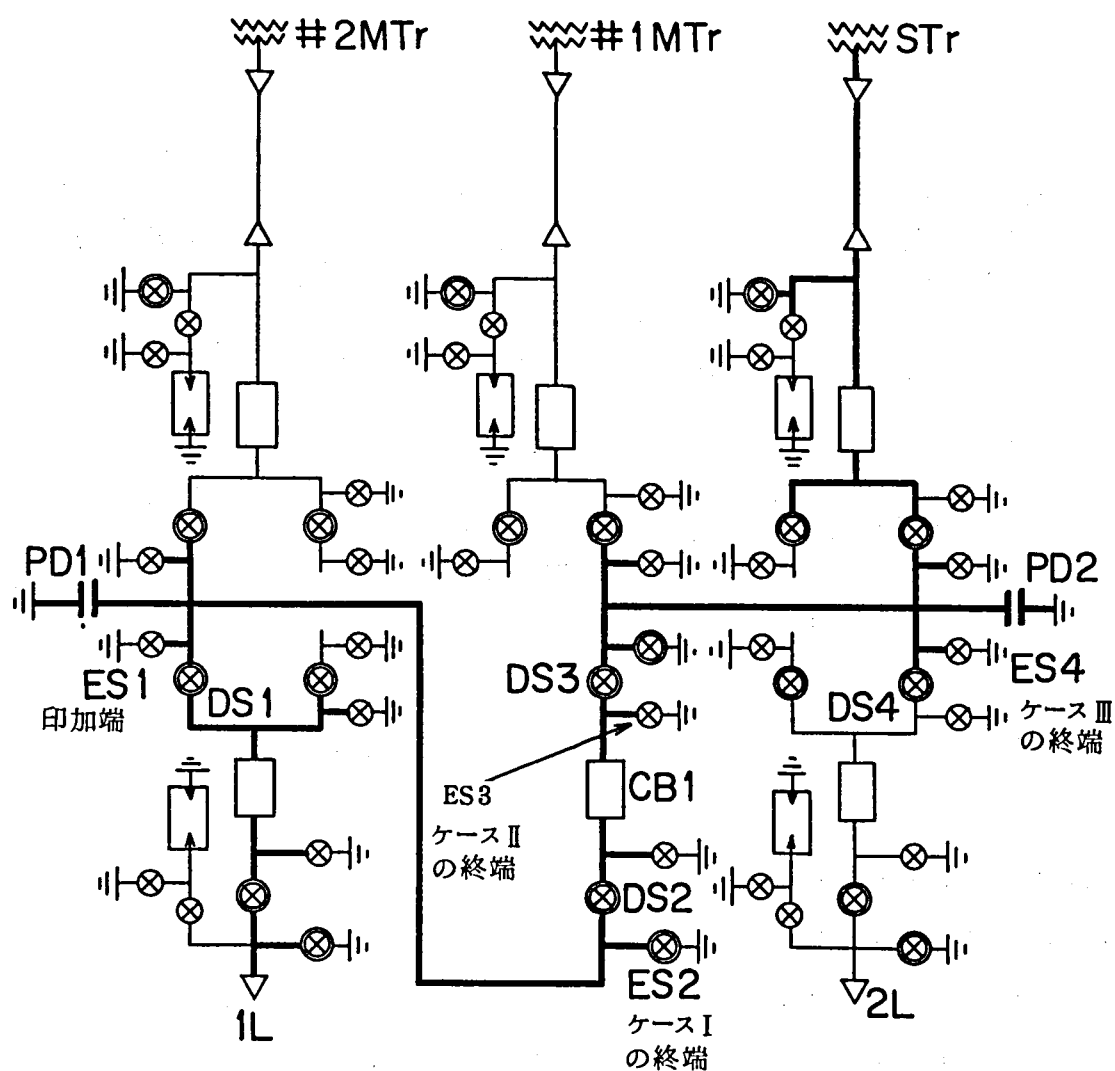
##### 3.1.1 対象GISの構成

このGISの主要定格は下記のとおりで、単線結線図は第3.2図のとおりである。

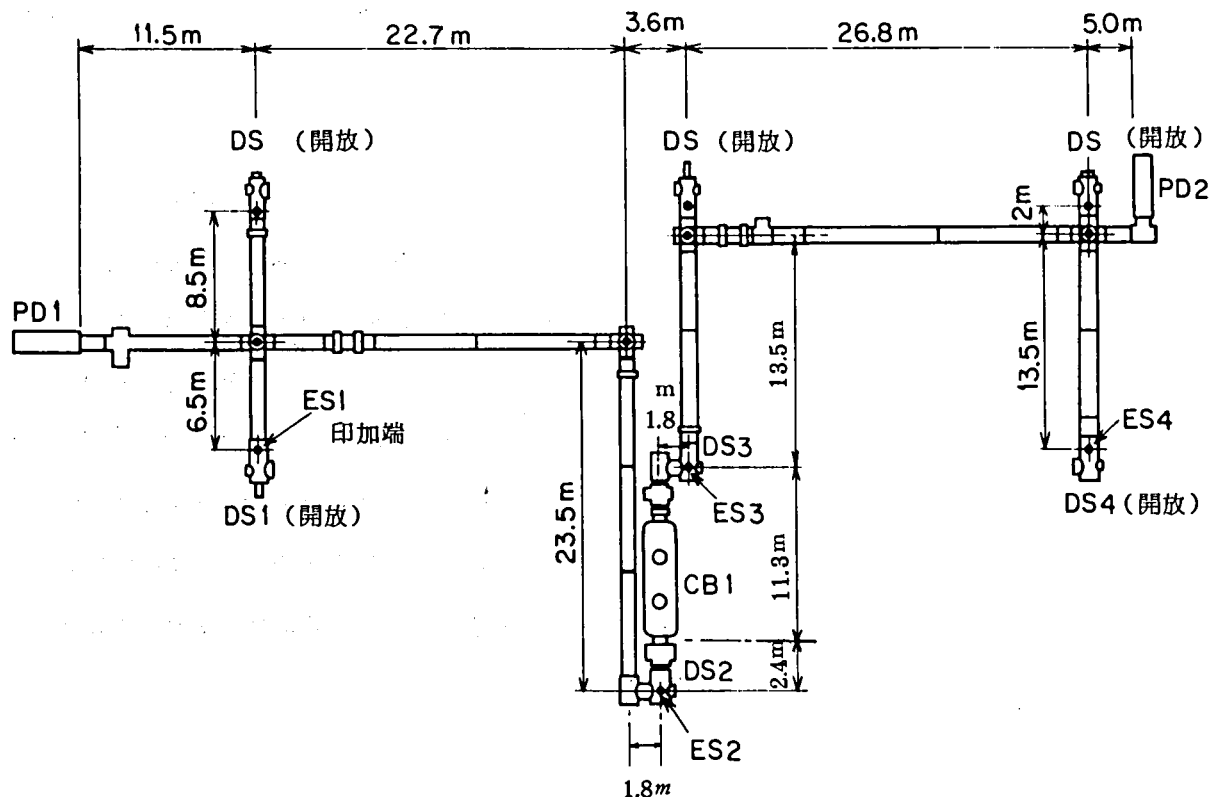
定 格 電 圧	5 5 0 kV
雷インパルス耐電圧レベル	1 8 0 0 kV
定 格 電 流	4 kA

50 kA

雷サージ特性の実測は、第 3.2 図の単線結線図の太線で示した回路を対象に行ったが、この部分の構成機器の接続状況と寸法は第 3.3 図に示すとおりであり、さらに各構成機器の特徴は次のようである。



第3.2図 500kV GIS 単線結線図



第 3.3 図 実測した G I S の構成機器の接続状況と寸法

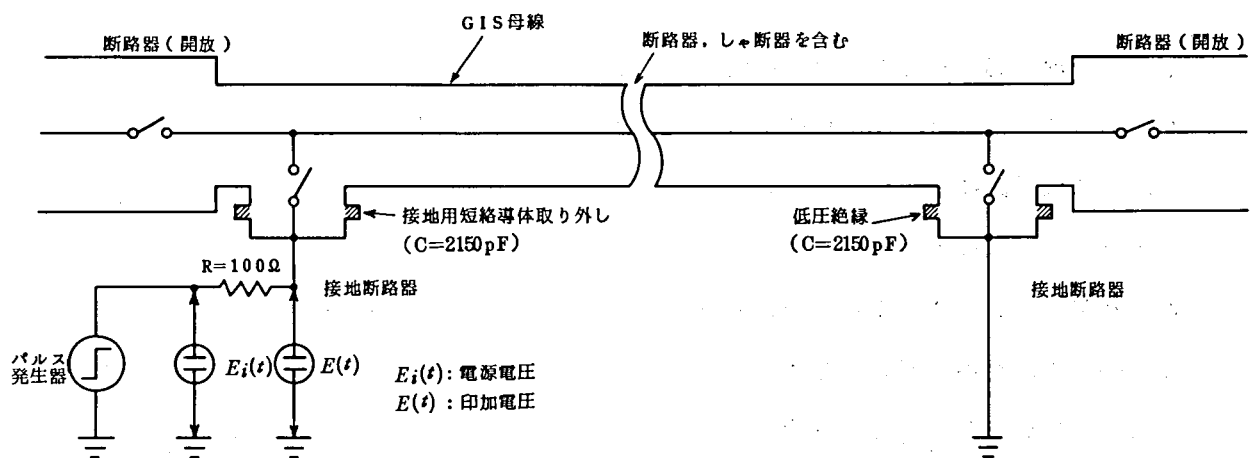
- (i) 主母線は導体径とタンク内径の比が 3.58 の同心円筒である。
- (ii) シャ断器 (CB) は全長約 7 m の接地タンク内に収納された 4 点切の構造で、各シャ断点には周囲に電界緩和用の同軸のシールドが配置されており、この部分のサージインピーダンスは母線部分より若干小さい値になっている。
- (iii) 断路器 (DS) は 1 点切で、開極状態では約 20 pF の静電容量をもっている。
- (iv) 接地用断路器 (ES) も 1 点切で、接地側端子も接地タンクに対して低電圧の絶縁がなされているので、通常は短絡導体により接地タンクに接続されているが、今回の測定の場合のように、この短絡導体を取り外した場合には、接地側端子とタンク間には約 2150 pF の比較的大きい対地浮遊容量をもつ。
- (v) 計器用変成器 (PD) は、金属箔と油浸紙を同軸に巻いた油浸コンデンサ形の本体を SF<sub>6</sub> ガス容器内に収納したもので、その静電容量は約 950 pF である。また、そのリードはコイルバネ式となっているので、インダクタンス 7.5  $\mu$ H が直列に挿入されている。

(Ⅵ) 計器用変流器は、タンクの外側に取りつけられた外装形で、サージ伝搬上はその影響を無視して差し支えない。従って、第 3.2 図、第 3.3 図の図中でも省略している。

(Ⅶ) 母線をはじめ各機器の導体部は、対地浮遊容量約  $2.0\text{ pF}$  のエポキシ製スペーサで約  $5\text{ m}$  ごとに支持されている。

### 3.1.2 測定方法と測定結果

雷サージ特性の測定は、GIS の全組立が完了し、内部に  $\text{SF}_6$  ガスを充填した状態で行った。電圧印加は試験対象区間の片端の接地断路器 (ES1) を閉じた状態で接地用短絡導体を取り外し、この断路器の導体を通じて行い、測定は他端の接地断路器 (ES2、または ES3、または ES4) を開極または接地とし、伝搬サージがこの点でそれぞれ正または負の反射を生ずる場合について行った。なお、この両端以外の接地断路器はすべて開極の状態としたが、後に述べる電位分布の測定で電圧測定を行ったものについては、(ES1) と同じ状態とした。第 3.4 図は、接地断路器 (ES1) から電圧を印加した場合の回路図で、直列抵抗  $100\ \Omega$  を通じて、電圧を印加し、直列抵抗の両端の電圧  $E_i(t)$  および  $E(t)$  を 2 現象オシロスコープにより測定した。



第 3.4 図 500 kV GIS のサージ特性測定回路

測定は、第 3.1 表に示す 3 ケースについて行い、第 3.5 図～第 3.7 図の測定結果を得た。

第 3.1 表 実測した系の構成

ケース	終 端	主母線長(m)	全容量 (pF)	包 含 機 器
I	ES 2 (DS 2 : 開放)	5 4.5	5 7 5 6	PD 1
II	ES 3 (DS 3 : 開放)	7 0.0	6 8 2 2	PD 1 CB 1
III	ES 4 (DS 4 : 開放)	1 2 3.8	1 0 4 1 8	PD 1 PD 2 CB 1

図中(a)は終端開放の場合、(b)は終端接地の場合で、各オツシログラムの上側は  $E_i(t)$ 、下側は  $E(t)$  である。印加電圧  $E_i(t)$  は、ほぼ矩形波とみなせる電圧であるが、 $E(t)$  は立ち上り部に若干のひずみと振動成分がみられる。このひずみは、先に述べたように、入射点に接地用断路器 (ES 1) の接地側端子の対地浮遊容量 2150 pF が挿入されていることによるものであり、振動成分は、電圧印加の瞬時のみに現われていること、直列抵抗 100  $\Omega$  と浮遊容量 2150 pF からきまる時定数 215 nS に比べて、振動周期が約 18 nS と極めて短いことから、測定回路の部分的な振動で、今回の測定においては本質的なものではない。

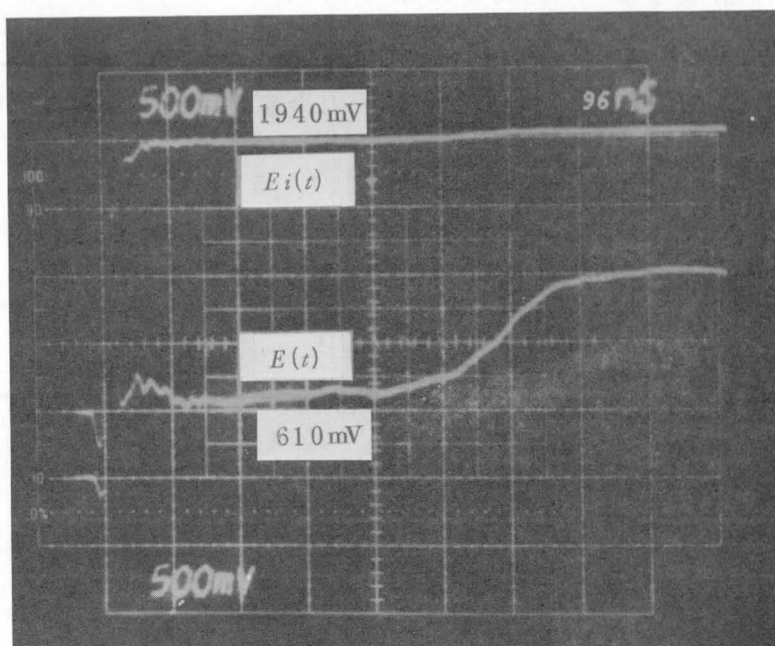
### 3.1.3 実測結果に対する考察

G I S を単純な同心のケーブル回路と考えることができるものとし、また、実測結果から得られるサージインピーダンス  $Z_e$  は、末端での反射が生ずるまでの間、 $E_i(t)$ 、 $E(t)$  がいずれも時間  $t$  に対して変化しないものとするれば、

$$Z_e = R \times \frac{E(t)}{E_i(t) - E(t)} \quad (3.1)$$

により、また、伝搬速度はサージ電圧が末端で反射して入射点に戻ってくるまでの時間から求めることができる。

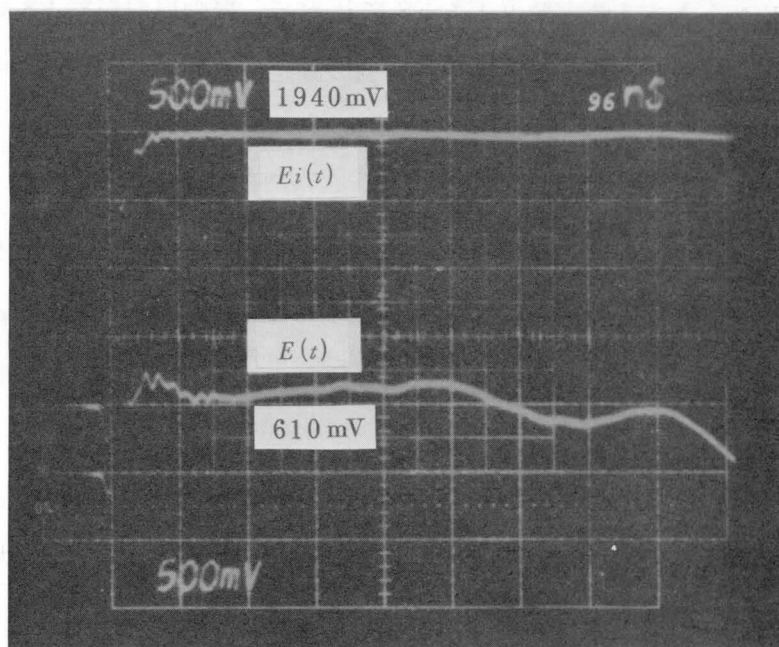
第 3.5 図、第 3.6 図のオツシログラムの比較的平坦な 200~300 nS の領域において、(3.1) 式によりサージインピーダンスを計算すると約 46  $\Omega$  ( $\approx 100 \times 610 / 1330$ ) となり、伝搬速度は、両図の(a)、(b)の  $E(t)$  とともに非常にゆるやかに変化しているので、末端からの反射波が到来した点を明確に見定めることは困難であるが、第 3.5 図の場合には、入射点からおよそ 0.45  $\mu$ s の点とみられ、入射点、反射点の実長が 54.5 m であるので、 $54.5 \times 2 / 0.45 = 242$  m/ $\mu$ s と光速の約 80% の値となる。



← 0 レベル  $[E_i(t)]$

← 0 レベル  $[E(t)]$

(a) 終 端 開 放

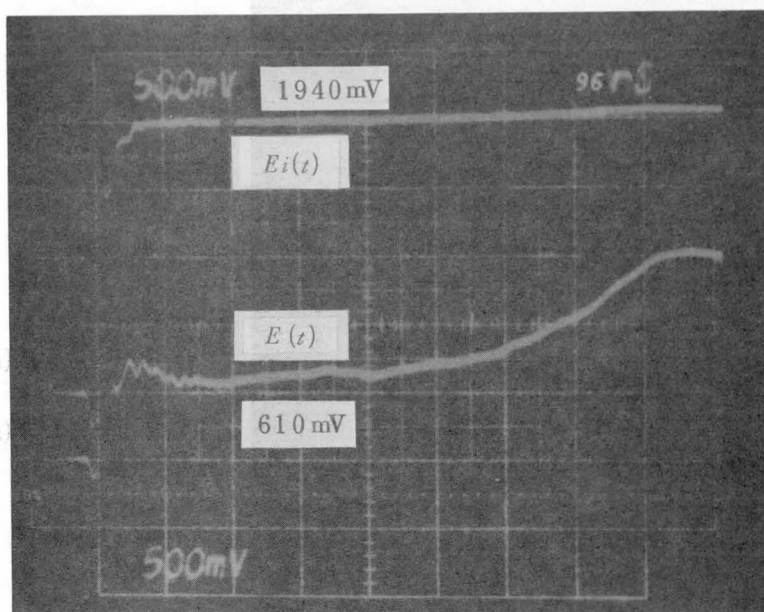


← 0 レベル  $[E_i(t)]$

← 0 レベル  $[E(t)]$

(b) 終 端 接 地

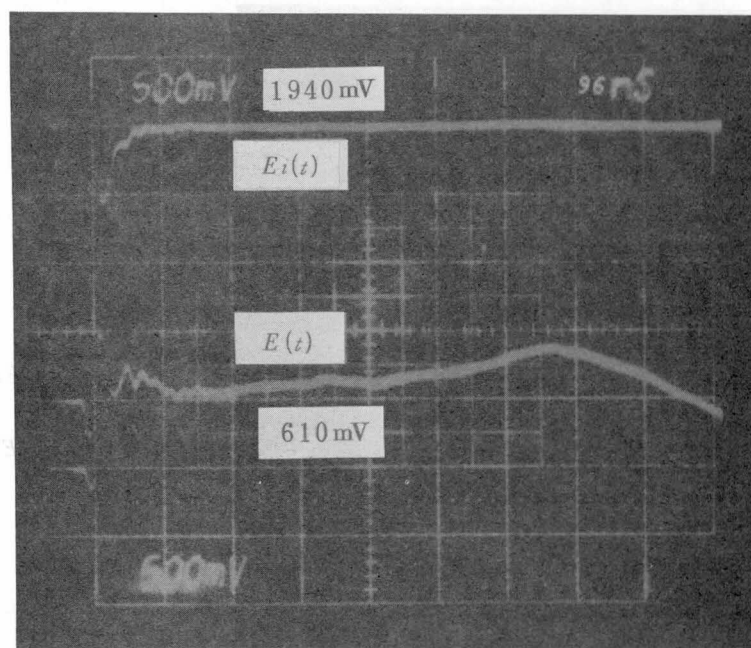
第 3.5 図 実測オシログラム ( ケース I )



← 0 レベル  $[E_i(t)]$

← 0 レベル  $[E(t)]$

(a) 終 端 開 放



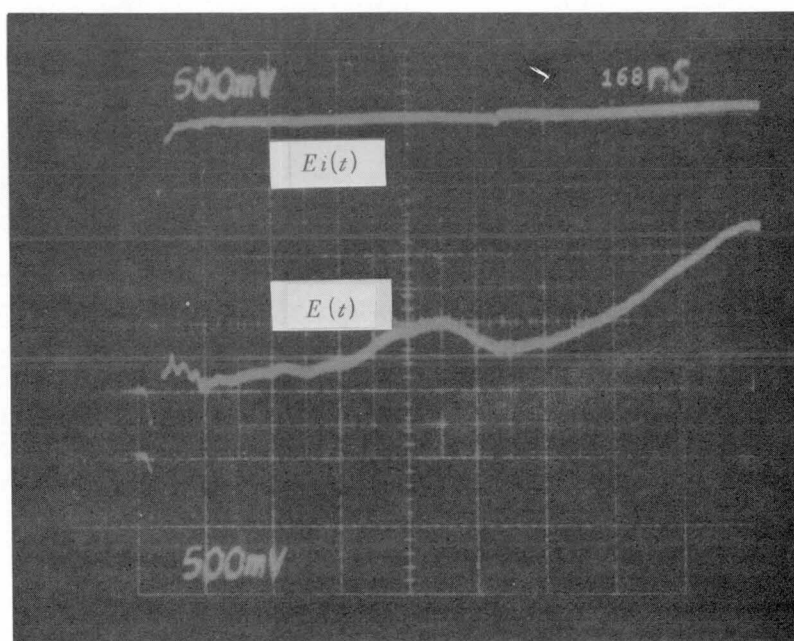
← 0 レベル  $[E_i(t)]$

← 0 レベル  $[E(t)]$

(b) 終 端 接 地

第 3.6 図 実測オシログラム ( ケース II )

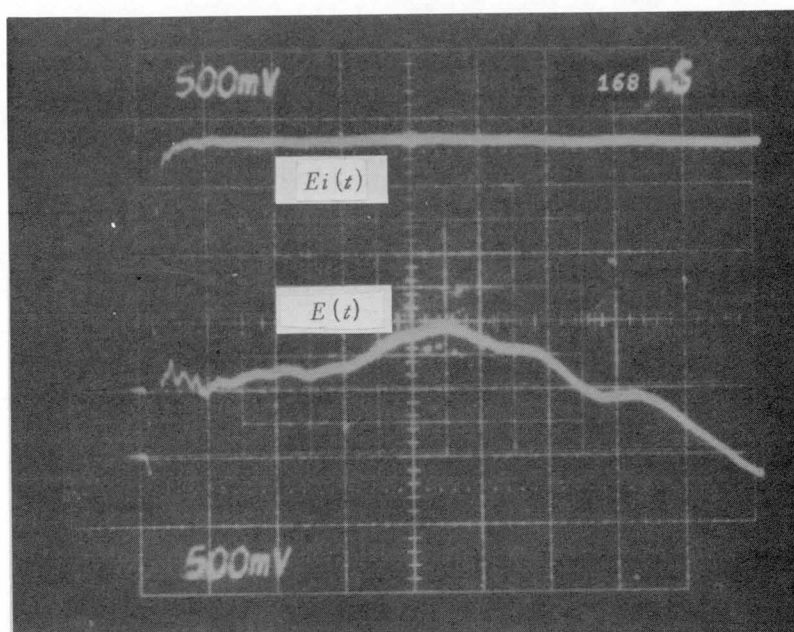




← 0 レベル (  $E_i(t)$  )

← 0 レベル (  $E(t)$  )

(a) 終 端 開 放



← 0 レベル (  $E_i(t)$  )

← 0 レベル (  $E(t)$  )

(b) 終 端 接 地

第 3.7 図 実測オシログラム ( ケース III )

一方、同心ケーブル回路の導体径を  $D_1$ 、接地外被の内径を  $D_2$  とすると、サージインピーダンス  $Z_c$  は理論的に

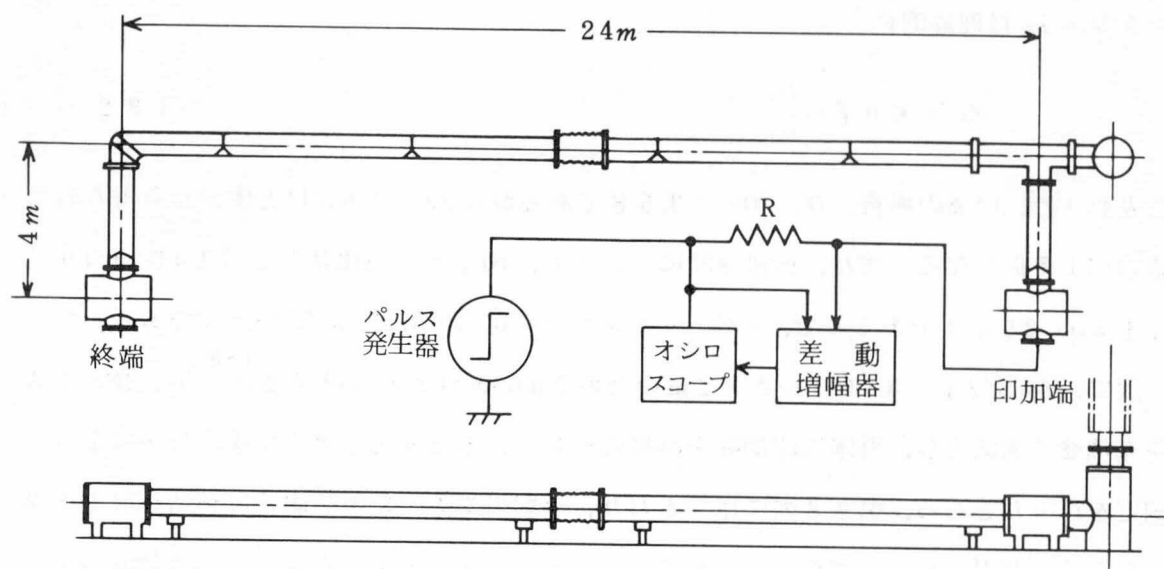
$$Z_c = 60 \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (3.2)$$

で表わされ、いまの場合、 $D_2/D_1 = 3.58$  であるから  $Z_c = 76.5 \Omega$  と実測から得られる値の約 1.7 倍になる。また、伝搬速度についても、 $\text{SF}_6$  ガスの比誘電率は 1.002049

(1 atm 25°C) であるので、スパーサの影響を考慮しても光速に近いはずである。

次に、 $D_2/D_1 = 3.16$ 、長さ 32 m の他の 500 kV GIS の母線部分<sup>(48)</sup>のみを  $\text{SF}_6$  ガスを充填せず大気とし、導体に印加線を直接接続して、第 3.4 図と全く同様の方法によって測定を行ったところ、第 3.8 図に示すとおり、反射点や  $E(t)$  の値を明確に判別し得るオシログラムが得られ、これからサージインピーダンスを (3.1) 式により求めた値、 $Z_c = 69 \Omega$  は (3.2) 式による理論計算値  $Z_c = 69 \Omega$  とよく一致し、伝搬速度も 295 m/ $\mu$ s とスパーサの影響が若干あるものの、光速に近い値を得た。

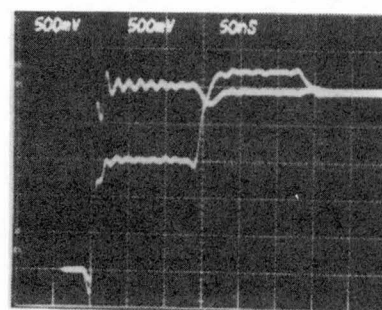
これから、第 3.1 表に示した 3 ケースに対する実測結果が、そのままでは理論計算値と大幅に異なる値となるのは、回路構成が母線のみでなく、しゃ断器、断路器、計器用変成器等の機器をすべて包括した複雑な形体となっているためで、GIS を単純な分布定数をもつ同心円筒回路として簡単に取り扱うことは、GIS 変電所の耐雷設計に際しては、不適當であることを示している。



(a) 500 kV ガス絶縁母線および測定回路



終 端 接 地



終 端 開 放

(b) 測 定 結 果

第 3.8 図 500 kV 絶縁母線単体のサージ特性測定

## 3.2 GISの雷サージ特性の解析法

### 3.2.1 構成機器の表現法

前節の結論から、GISのサージ解析には、各構成機器を適切に表現することが必要となり、このためには種々の方法が考えられるが、理論的にも妥当で、取り扱いが簡便で、しかも一般性のある方法として、

- (i) GIS内の伝搬速度は光速とする。
- (ii) 母線のサージインピーダンスは(3.2)式で与えられるものとする。
- (iii) シャ断器、その他の各構成機器は、母線と同じサージインピーダンスをもつものとしこれに各機器の状態に応じて、固有の静電容量、インダクタンスを付加または補正したものとする。

ことを基本として、具体的には各機器の取り扱いを次のとおりとすることにした。

- (i) 主母線：サージインピーダンスは(3.2)式、長さは実長、減衰なしの分布定数線路とし、その母線内にあるスパーサの合計静電容量を母線の両端にわけて集中付加する。ただし、主母線が長くなると減衰を考慮する必要があるのは当然である。

- (ii) 分岐母線：長い分岐母線は主母線と同じ表現とする。

ただし、分岐母線の長さが短くて、計算のきざみ時間を $\tau$ としたとき、その長さが $C_0\tau$  ( $C_0$ は光速度) 以下の場合には、その総対地容量 $C_b$ を対地集中容量で表現する。

- (iii) シャ断器：閉極時には、その電源側に付加容量 $C_{cb}$ をもつシャ断器と等長の母線として取り扱う。ただし、 $C_{cb}$ の値はシャ断器の総対地容量とこれに対応した主母線の総対地容量の差である。

開極時には、極間容量を対地容量として付加する。

- (iv) 断路器：閉極時には主母線の一部として取り扱い、開極時には極間容量を対地容量として付加する。

- (v) 接地断路器：閉極時には接地となる。ただし、電圧印加または電圧測定の目的に用いる場合には、対地浮遊容量を付加する。

開極時には、対地容量を無視する。

- (vi) 計器用変成器：コンデンサ形の場合はその静電容量を対地容量として取り扱う。電圧増巾形の場合には母線の一部とする。

- (vii) 計器用変流器：外装形であるため無視する。

(viii) ZnO避雷器：2.3で述べたように取り扱うことを原則とするが、さらに実際面を考慮した場合については、4.5.6において具体的に詳しく述べる。ただし、実測結果との対比を行う場合のように、低電圧サージの伝搬を対象とする場合には無視する。

(ix) 変圧器、リアクトル：対地静電容量を集中容量として表わす。

(x) ブッシング：コンデンサブッシングの場合には、その対地静電容量を集中容量として付加する。

(xi) その他：機器にコイルバネリードのようなインダクタンスが付属している場合には、その値を忠実に当該機器回路に付加する。

### 3.2.2 500 kV GISのEMTPによる解析結果

前節の方法によって、雷サージ特性を実測した第3.3図の500 kV GISの各構成機器を表現すると第3.2表となる。

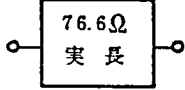
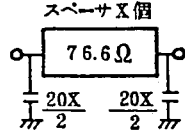
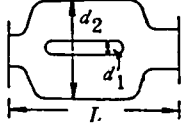
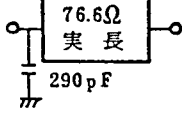
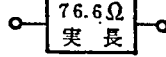
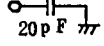
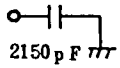
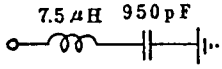
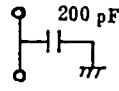
これによって、第3.1表に示した3ケースに対する回路を構成し、EMTPを用いて、実測の場合と同様に $E_i(t)$ の電源電圧を印加したときの $E(t)$ の値を計算すると、第3.9図～第3.11図の破線で示す結果となる。

これらを、それぞれ、各図中の実線で示した第3.5図～第3.7図のオシログラムから転記した実測値と比較すると、電圧印加の直後を除けば、極めてよく一致した結果となっている。電圧印加直後の実線部の振動は測定回路の部分的な振動で本質的なものでないことは、すでに3.1.2において述べた。

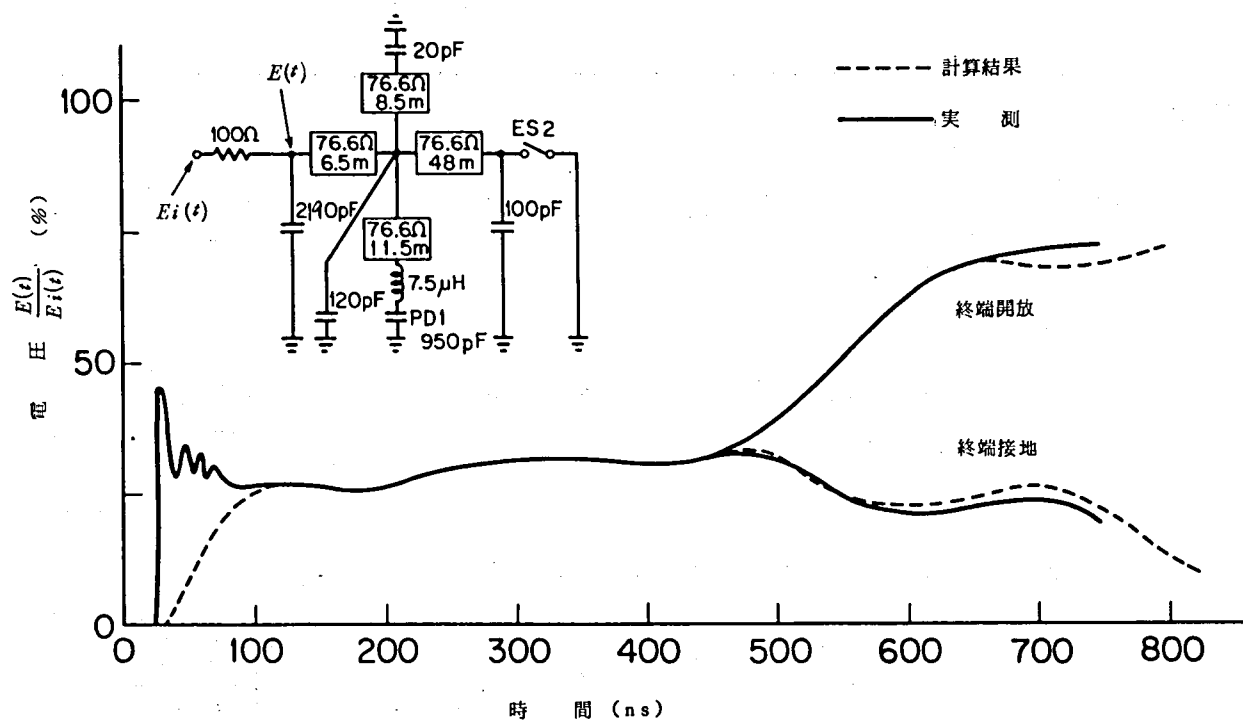
なお、ケースⅠの回路において、スパーサ等伝搬速度に影響する誘電体を取り除き、サージの伝搬速度を光速の90%である $270\text{ m}/\mu\text{s}$ として計算した結果は、第3.12図の一点鎖線で示したとおり、時間の経過に従って大きく誤差を生じ、かえって実用的でないことが判明した。

以上のとおり、サージインピーダンス、伝搬速度からみたGISの雷サージ特性は、各機器を3.2.1で述べた方法を用いて表現することによってはじめて精度よく解析できることになる。

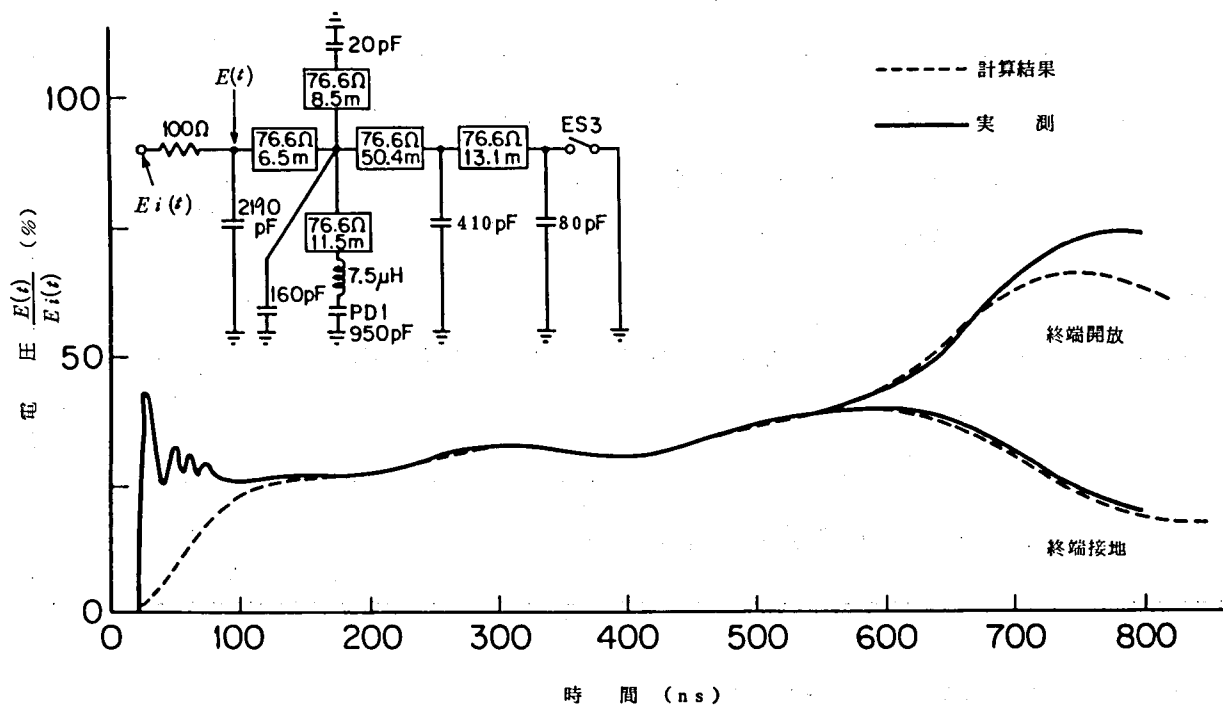
第3.2表 500kVGIS構成機器とサージ計算上の表現

構成機器	サージ計算上の表現	回路
ガス絶縁母線	$Z = 60 \ell_n \frac{D_2}{D_1} = 76.6 \Omega$ 、減衰なし、伝搬速度＝光速 実物長の分布定数線路	
スペーサ	対地静電容量 20 pF/個×(節点間のスペーサ数)Xを節点の両端に集中して付加する。	
しゃ断器	閉極時には、しゃ断器と母線の静電容量の差 $C_{cb}$ $C_{cb} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ell_n d_2/d_1} - \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ell_n D_2/D_1} = 290 \text{ pF}$ を節点に付加した母線とする。 	閉極時 
断路器	閉極時には母線の一部とする。 開極時には極間容量 20 pF を対地容量とする。	閉極時  開極時 
接地断路器	電圧印加又は電圧測定のために用いる閉極したものは 対地静電容量 2150 pF を付加する。 開極時は対地容量を無視する。	電圧測定用 
計器用コンデンサ形変成器	950 pF の対地静電容量と直列インダクタンス 7.5 μH を付加	
ブッシング	200 pF の対地静電容量を付加する。	

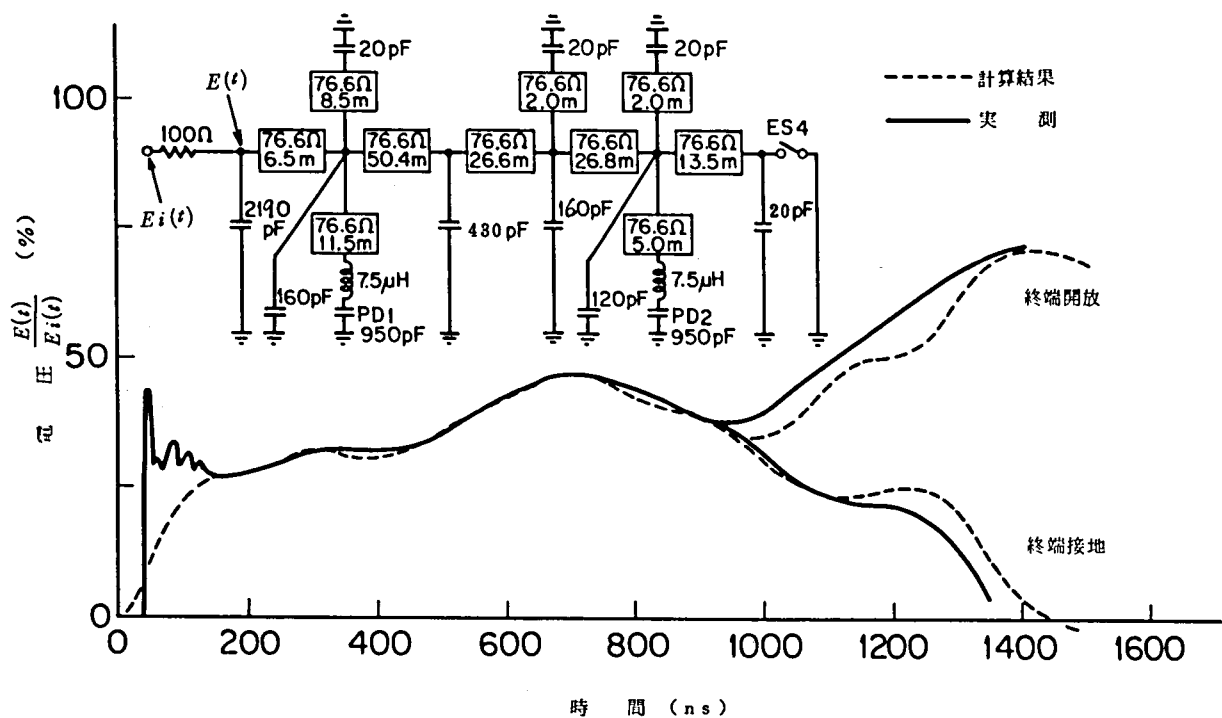
注：計器用変流器は外装形のため関係なし。



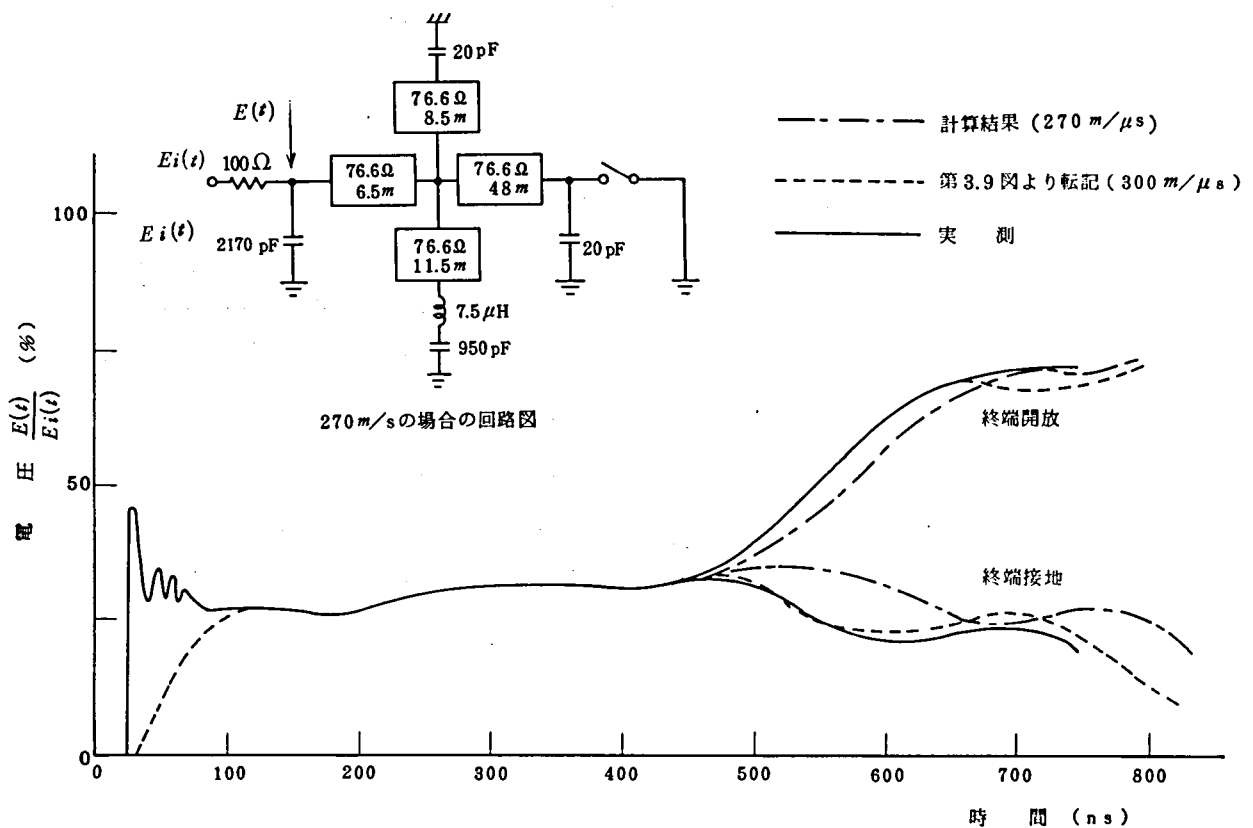
第 3.9 図 計算結果と実測結果との比較 (ケース I)



第 3.10 図 計算結果と実測結果の比較 (ケース II)



第 3.11 図 計算結果と実測結果の比較 (ケースⅢ)



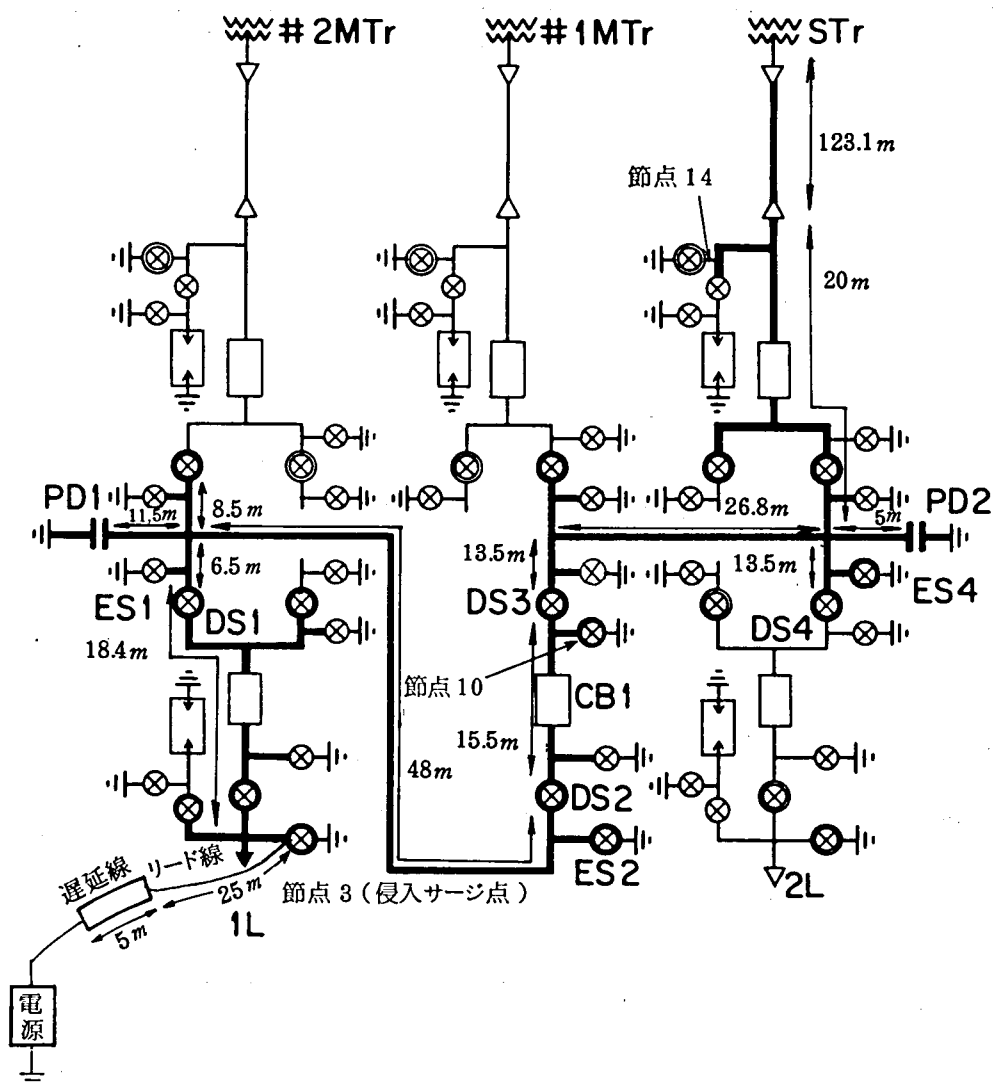
第 3.12 図 伝搬速度をかえた場合の計算結果 (ケースⅠに対応)



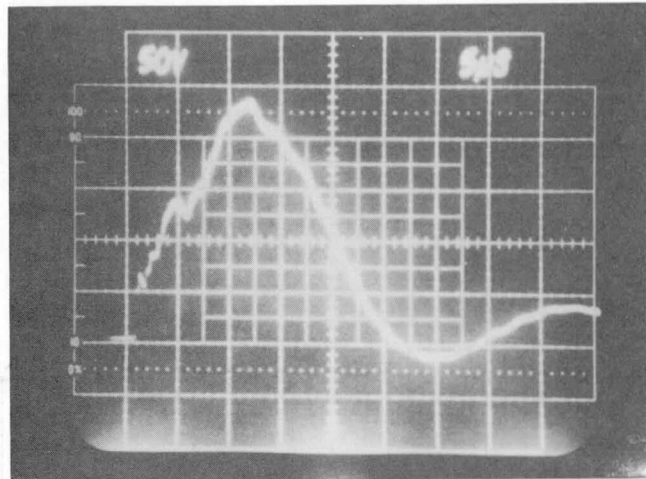
### 3.2.3 GIS内のサージ電圧分布からみた検討

500kV GISの実測では、上記の測定のほか、送電線から侵入したサージによってGIS内部の各点に生ずる電位分布についても測定を行った。第3.13図はこの場合の測定の一例で、図の太線で示した回路に対し、送電線1Lの線路端から第1鉄塔での逆閃絡を模擬するための遅延ケーブルを通してステップ状サージ電圧を印加し、各測定点の波形を観測した。測定点の代表例として、節点3（遅延ケーブル出口）節点10および節点14の実測波形を示すと、第3.14図(a)、(b)、(c)となる。ただし、この場合も電圧印加は送電線側接地断路器の端子から行ったので、この端子の対地容量の影響による波形ひずみを生じており、波形としては実際の逆閃絡サージ波形を忠実に示しているものではない。

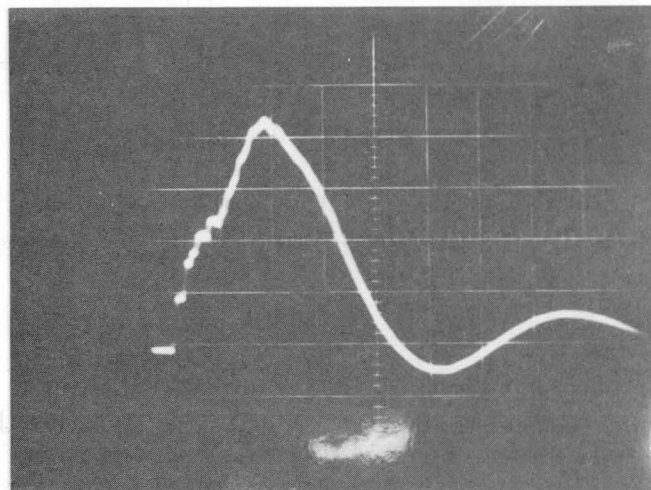
第3.13図の測定回路を第3.2表によって表現すると第3.15図になる。



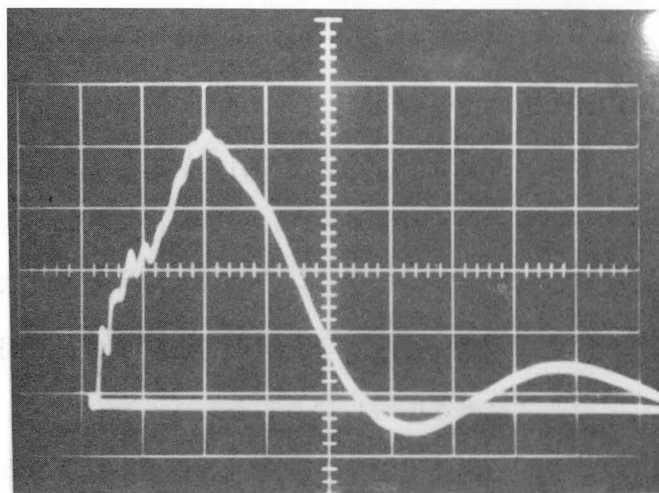
第3.13図 GIS内サージ電位分布の測定回路図



(a) 節 点 3 (遅延ケーブル出口)



(b) 節 点 10

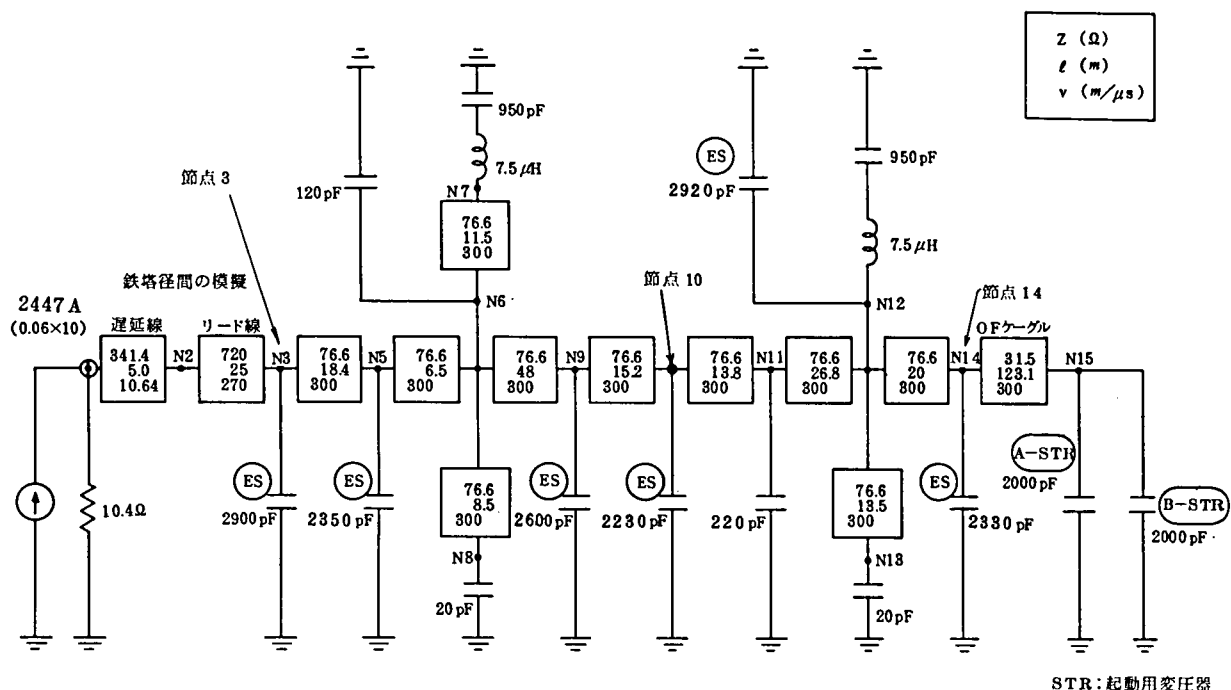


(c) 節 点 14

50 V/div

5  $\mu$ s/div

第 3. 14 図 G I S 内サージ電位分布の実測波形



第 3.15 図 500 kV GIS 電位分布解析回路構成図(避雷器なし、第 1 鉄塔直撃雷)

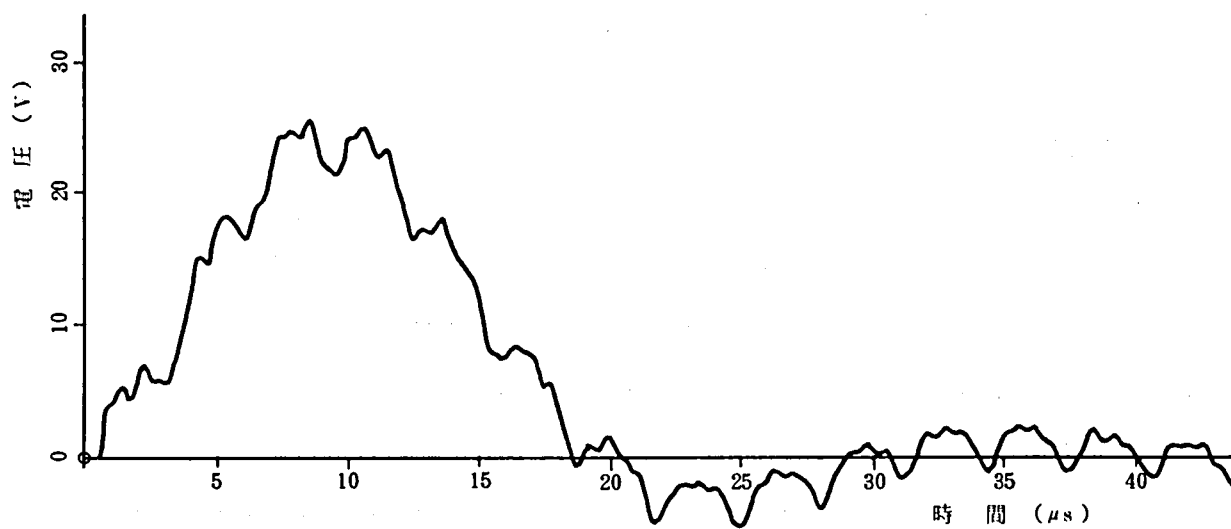
注) 計算きざみ時間を  $0.02 \mu s$  としたので、 $300 \times 0.02 = 6 m$  以下の分岐母線は集中容量で表わした。

第 3.16 図は、この回路についてサージの侵入条件を実測の場合と同様にし、EMTP を用いて計算した結果で同図の(a)、(b)、(c)に示す節点 3、節点 10、および節点 14 の波形は実測結果の第 3.14 図の(a)、(b)、(c)とそれぞれよく一致している。従って GIS の電位分布の観点からも、3.2.1 で述べた表現法は妥当であると考えられる。

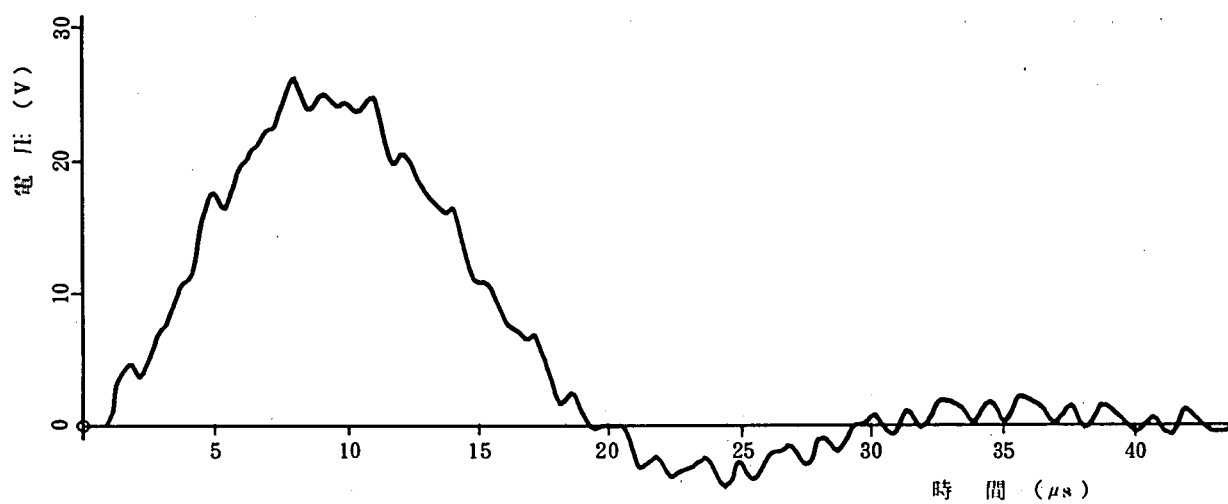
### 3.3 サージ計算に必要な GIS の表現法

500 kV GIS におけるサージ試験結果およびこれに対応した EMTP による解析結果との比較から、複雑な構成要素をもった GIS を、現在一般に広く用いられているように、一定の定数をもった単純な同心円筒導体としてサージ解析を行うことは不適当であり、以下のように取り扱うことによってはじめて適正な解析が可能となることを明らかにした。

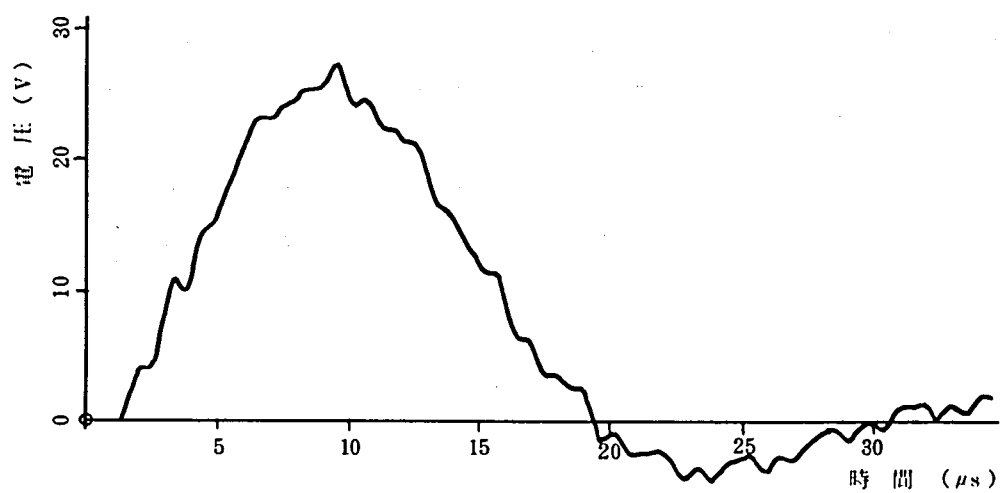
- (i) GIS 内のサージ伝搬速度は光速に等しいとする。
- (ii) サージインピーダンスは同心円筒に対する理論式から得られる値とする。
- (iii) スーパーをはじめその他機器の静電容量、インダクタンス等各構成機器の特質を適正に評価し、忠実に付加する。



(a) 節 点 3 の電位



(b) 節 点 10 の電位



(c) 節 点 14 の電位

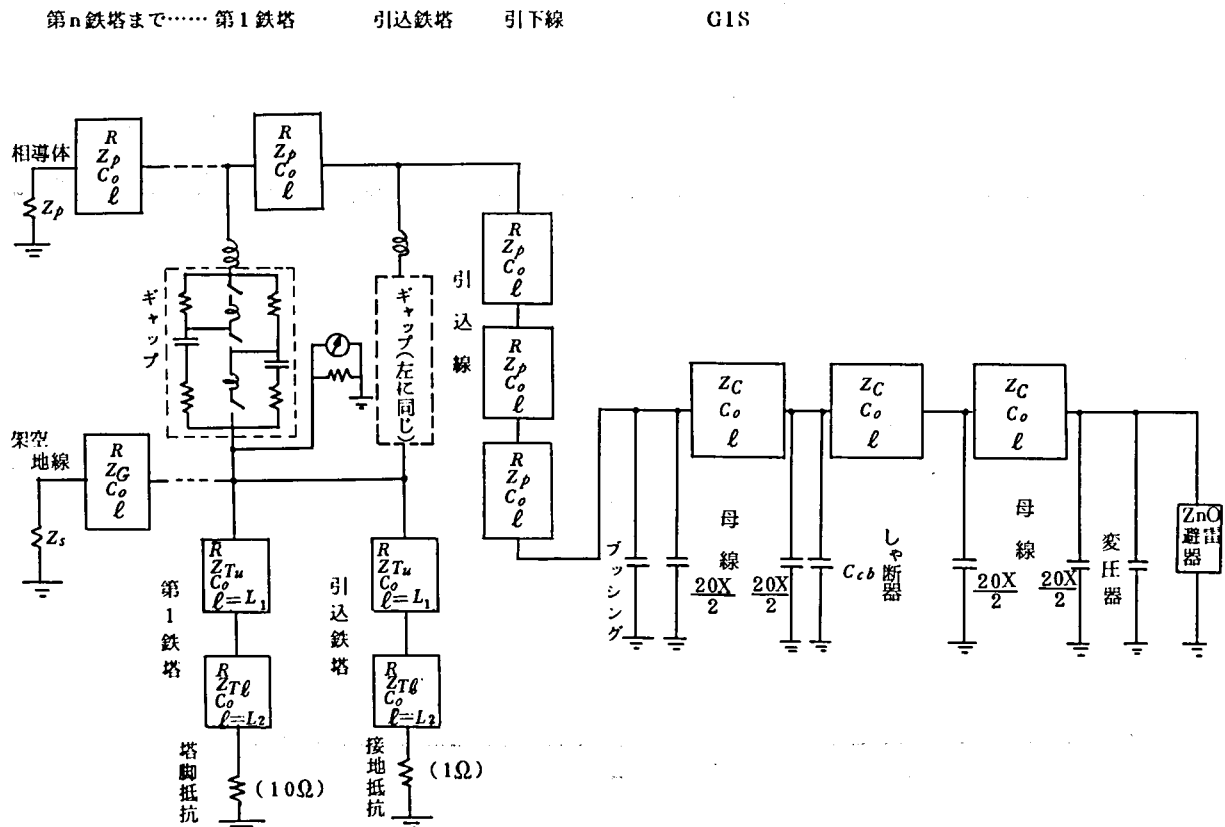
第 3.16 図 GIS 内サージ電位分布の EMTP による計算結果

## 第4章 UHV送電線からGIS変電所への侵入雷サージの解析

### 4.1 具体的解析方法

GIS変電所に対する耐雷設計を検討するにあたっては、まず、主要因子である鉄塔、ホーンギャップ、ZnO避雷器、GISについて、それぞれ第1章～第3章において述べた表現法を適用し、さらに、サージがGISに侵入するまでの過程に関する因子として、架線、鉄塔腕金、鉄塔の塔脚接地抵抗、引込口の引込線、GIS入口のブッシング等を考慮した第4.1図に示す回路図を構成することによりはじめて、精度の高い解析を行うことができる。

勿論、鉄塔腕金以下の因子については、GISへの侵入サージに及ぼす影響の程度により考慮すべきもの、無視しても差支えないものが混在していると考えられるので、本章においては、UHV系統を対象とした具体的解析を通じてこれらについて詳しく検討するとともに耐雷面からみたUHV系統の特徴を明らかにすることにした。



第4.1図 EMTTPによるGIS変電所の逆閃絡サージ解析回路の例

なお、サージのコロナ変歪については、予想雷撃地点である第1鉄塔からGIS入口までが100mと至近距離にあること等の理由から考慮しないことにしたが、サージの長距離伝搬等を対象とする場合には考慮することとならう。また、鉄塔を100Ω程度の単一のインピーダンスで表現する等従来の方法によった場合との結果の比較およびGISへの侵入サージに及ぼす影響の観点からみたZnO避雷器の時間効果の問題についても具体的に考察することにした。

## 4.2 解析上の基本的条件

### 4.2.1 UHV鉄塔のサージインピーダンスと導体類の諸定数

第4.2図(a)は1200kV UHV 2回線鉄塔の概念設計の一例である。鉄塔の高さは約130mであるが、地上の電界強度を低減するために、地上高約41mのところに10条のシャヘい線を設けてあることが大きな特徴である。また、4.1表はこの場合の導体構成表<sup>(50)</sup>で、相導体は可聴騒音の低減のために、多導体直径約1.3mと大きなものとなっている。

第4.2図(a)によると、シャヘい線から下部は単なる支柱部であるが、シャヘい線から上部の範囲にはアームおよび電線類が存在しているので、1.5に述べた考え方によって同図(b)に示すように、シャヘい線から上部を上部サージインピーダンス $Z_{Tu}$ 、下部の支柱部を下部サージインピーダンス $Z_{Tl}$ と分けることができる。

いま、 $Z_{Tu}$ 、 $Z_{Tl}$ を $\kappa_{Tu} =$

0.5、 $\kappa_{Tl} = 1$ として

4.1表 1200kV 2回線送電線の電線概要表

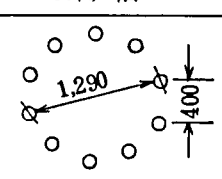
(1.26)式および(1.28)

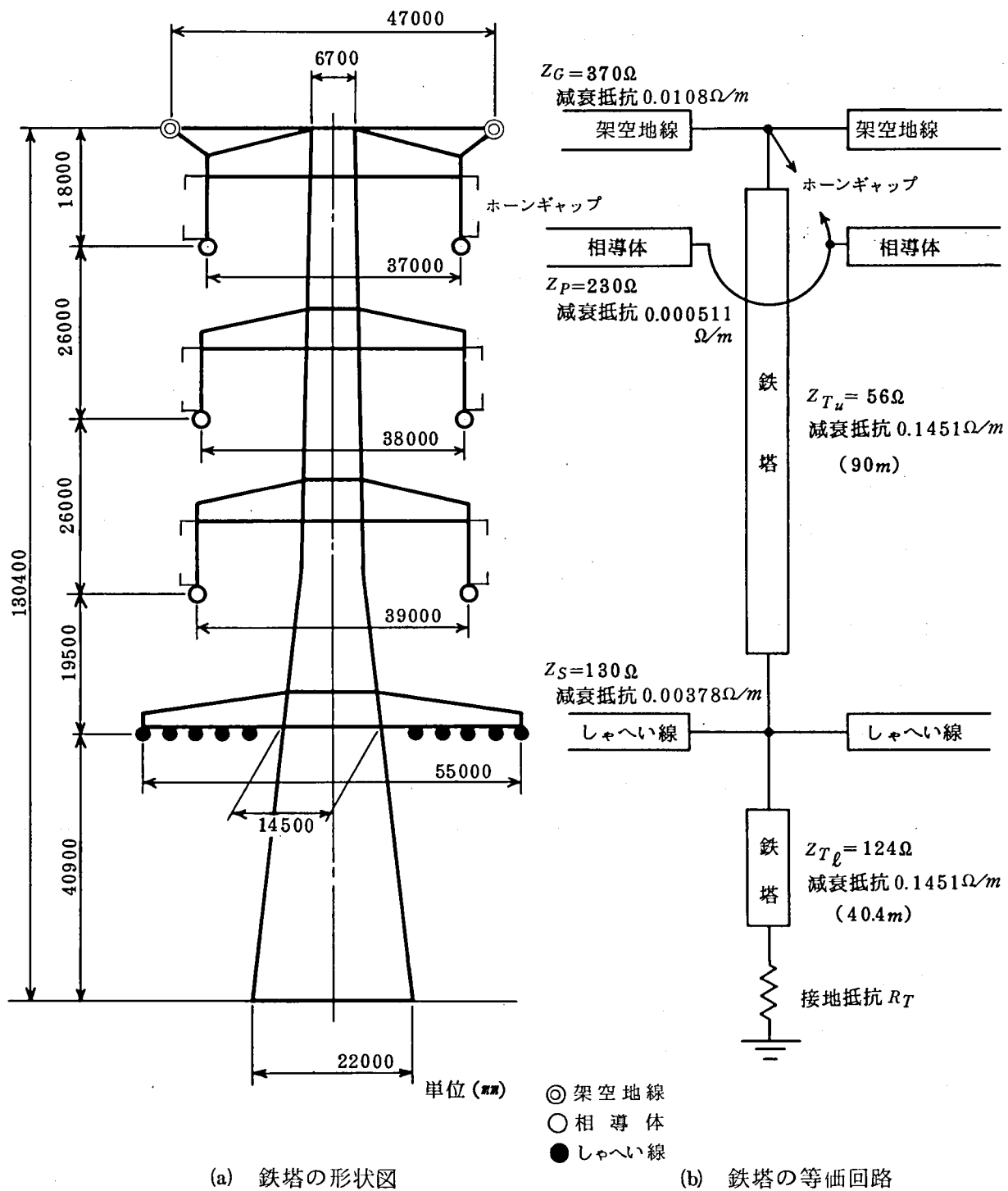
式から求めると、それぞれ $Z_{Tu} = 56\Omega$ 、 $Z_{Tl} = 124\Omega$ となる。

また、架空地線、相導体、シャヘい線の諸定数を求めると、それぞれのサ-

ージインピーダンスは370Ω、230Ω、130Ω、減衰定数は0.0108Ω/m、0.000511Ω/m、0.00378Ω/mとなる。〔付録-3〕

従って、シャヘい線を架空地線と同様に、それ自身のサージインピーダンスとして表わすと、鉄塔全体の等価回路は第4.2図(b)のようになる。

導体	ACSR 950mm×10条/相	
	素導体直径(mm)	41.8
	間 隔(mm)	400.
	多導体直径(mm)	1290.
		
架 空 地 線	ACSR	950mm×2条/基
し ゃ へ い 線	AS	100mm×10条/基



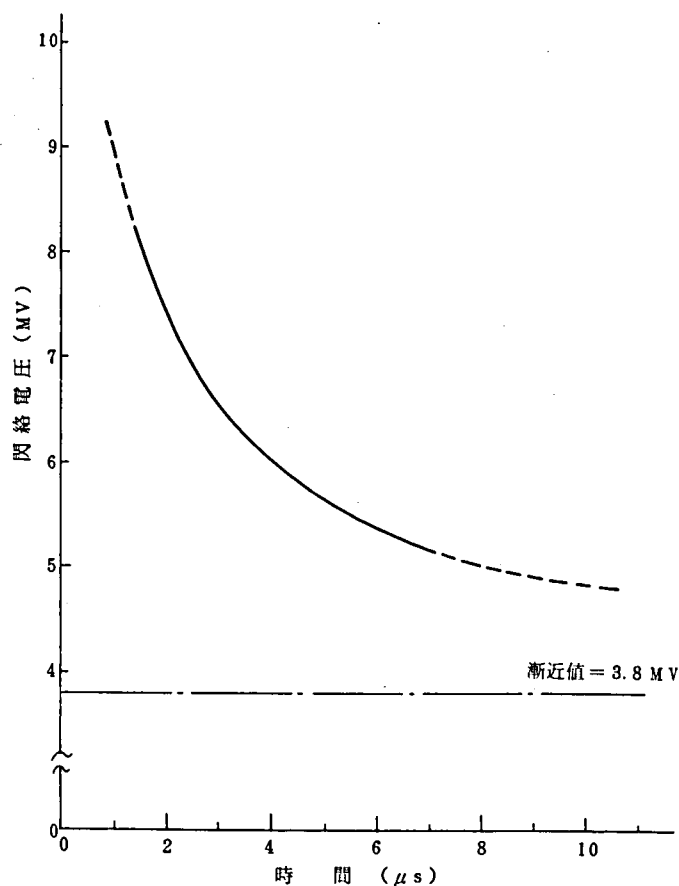
第 4.2 図 1200 kV UHV 鉄塔とその等価回路

#### 4.2.2 UHV用ホーンギャップのV-t特性とその表現

UHV用ホーンギャップはギャップ長<sup>(51)</sup>7.5 mで、そのV-t特性は第4.3図のとおりである。

この図から $t \rightarrow \infty$ における閃絡電圧を求めると、3.8 MVであり、2.1で述べたように $K = 1 \text{ MV}/\mu\text{s}$ における $t$ を求めると、 $t = 5.5 \mu\text{s}$ となるので、これらの値を(2.4)式に代入すると、 $RC \simeq 1$  (4.1)が得られ $R = 0.5 \text{ M}\Omega$ とすると $C = 2 \text{ pF}$ となる。この値を第2.2図の回路に代入してV-t特性を計算すると第4.4図のように第4.3図のV-t特性と極めてよく一致した結果が得られる。

また、7.5 mのギャップの放電時には、 $10 \mu\text{H}$ 程度のインダクタンスがあると考えられるので、これを考慮してEMTPによるサージ計算



第4.3図 7.5 m ホーンギャップのV-t特性

に際しては、第4.5図に示す等価回路によりUHV用7.5 mホーンギャップを表現した。

#### 4.2.3 鉄塔腕金のインダクタンス

鉄塔腕金の鉄塔サージインピーダンスに対する取り扱い方については、1.5において述べたとおりであるが、ホーンギャップが閃絡した場合を考えると、鉄塔腕金は相導体に流入するサージ電流の通路となるので、直列要素として作用し、そのインダクタンスは逆閃絡サージの特性に大きな影響を及ぼすものと予想される。UHV鉄塔では、腕金のインダクタンス $L_a$ は $20 \mu\text{H}$ 以上と考えられるので、今回の計算では $L_a = 20 \mu\text{H}$ を考慮することにした。

#### 4.2.4 塔脚接地抵抗

第1鉄塔以遠の鉄塔の塔脚接地抵抗は、いずれも $10 \Omega$ 、引込鉄塔は変電所接地網との連接を考慮して $1 \Omega$ と標準的な値とした。

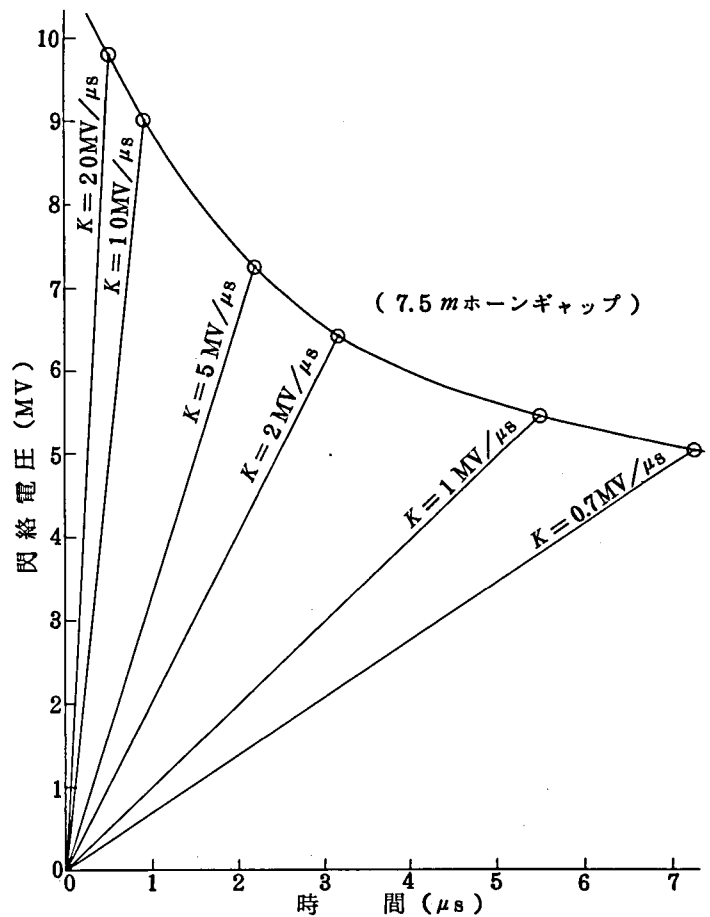


#### 4.2.5 架空線とGISの接続部

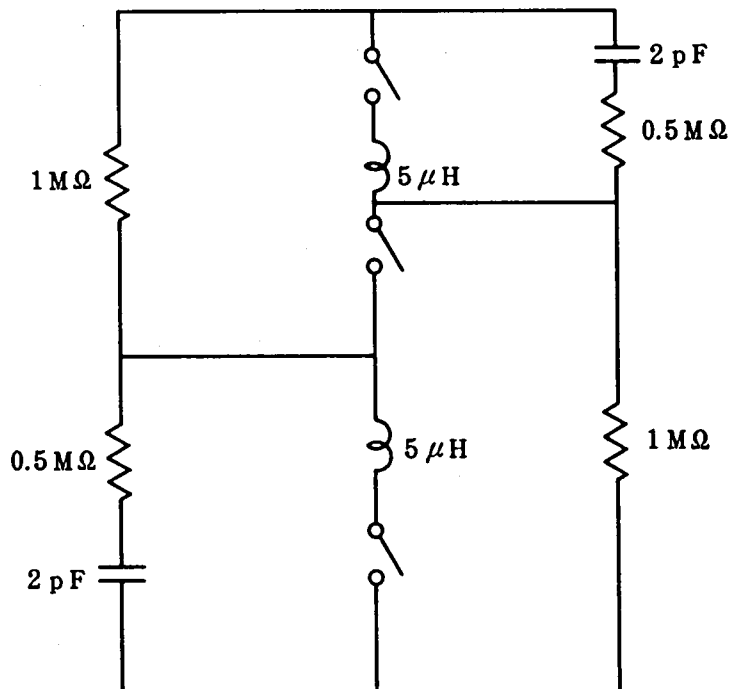
(GIS入口)における静電容量  
架空線とGISの接続は、ブッシングによって行われ、この対地静電容量は一般に400 pF程度であるので、これを考慮した。

#### 4.2.6 GIS

GIS内のサージ伝搬特性の解析には、各構成機器ごとに厳密な表現が必要であることは、3.3において述べたとおりであるが、ここでは送電線からGISへ侵入するサージの様相の検討が主目的であるので、簡単のため、UHV GISの母線サージインピーダンスにほぼ等しい60  $\Omega$ の無限長線路として取り扱った。



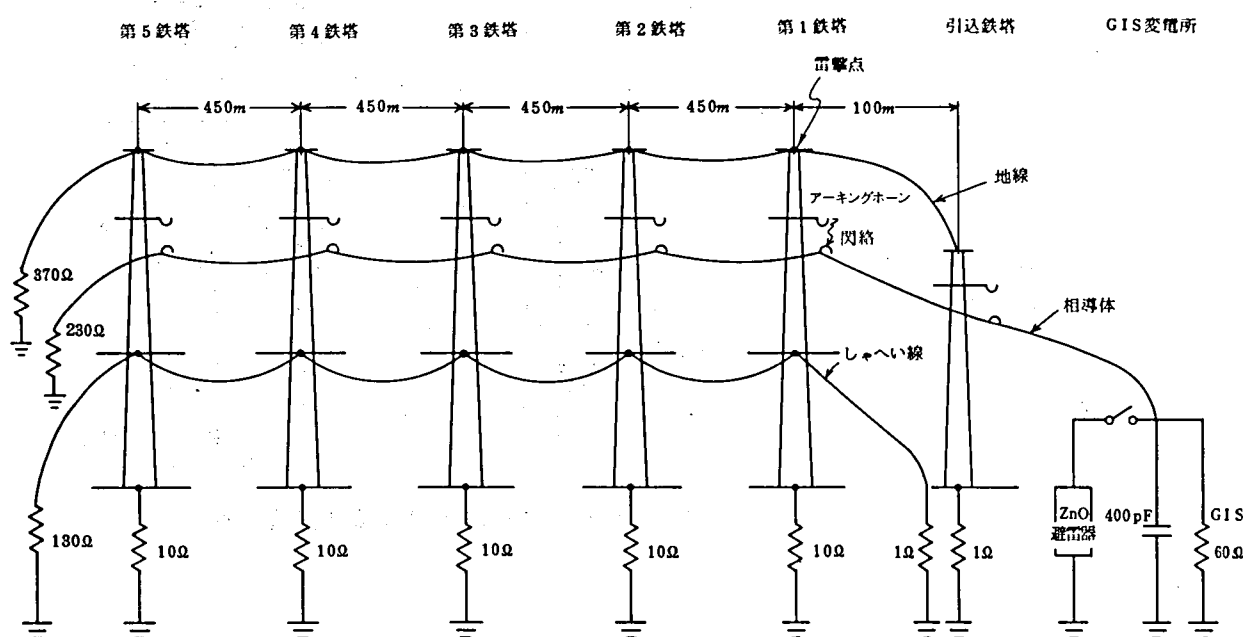
第4.4図 7.5 m ホーンギャップの等価回路の特性



第4.5図 EMTPに対する7.5 m  
ホーンギャップの表現回路

### 4.3 解析回路の構成

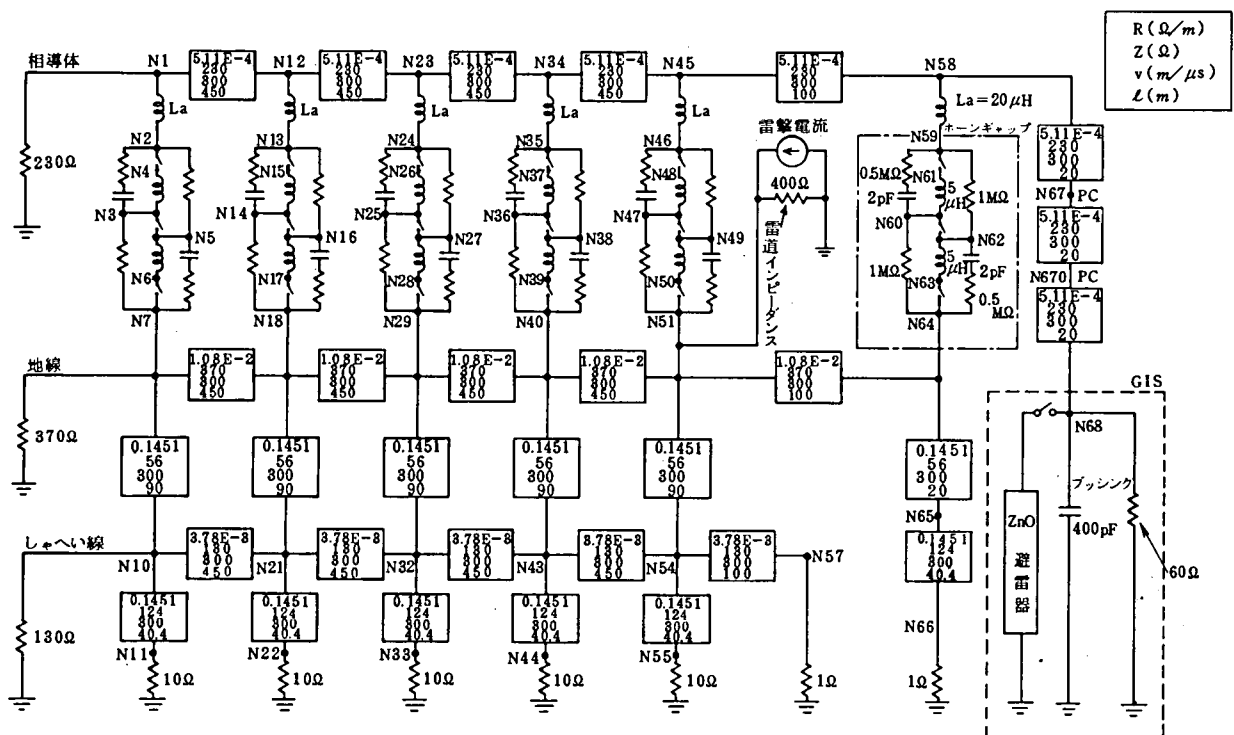
第4.6図は本章の計算に用いた回路の概念図で、UHV線路としては、GISから引込鉄塔を経て第5鉄塔までを考えることとし、第1鉄塔への直撃雷による逆閃絡により発生する最も過酷なサージがGISへ侵入するものとした。



第4.6図 計算回路概念図

計算の範囲を第5鉄塔までとしたのは、第1鉄塔と引込鉄塔間は100mであるが、その他の鉄塔間スパンは450mであるので、第1鉄塔から第5鉄塔までのサージの往復時間は $12\mu s$ となり、検討対象としている時間範囲では、これより遠方の鉄塔の影響は現われないためである。

前節の基本条件に基づいて、第4.6図の概念図をEMTPによる計算に必要な等価回路で表現すると第4.7図となる。



第 4.7 図 逆閃絡サージの EMT による計算回路

#### 4.4 解析結果

##### 4.4.1 直撃雷による鉄塔電位上昇と逆閃絡

第 4.6 図の第 1 鉄塔に生じた直撃雷の雷撃電流は、波形を  $2 \times 70 \mu s$  のサージ波形、  
 電流ピーク値を  $I_o$  (kA) とすれば次式で表わすことができる。

$$i_o(t) = 1.024 I_o (e^{-0.01025t} - e^{-2.819t}) \quad (4.2)$$

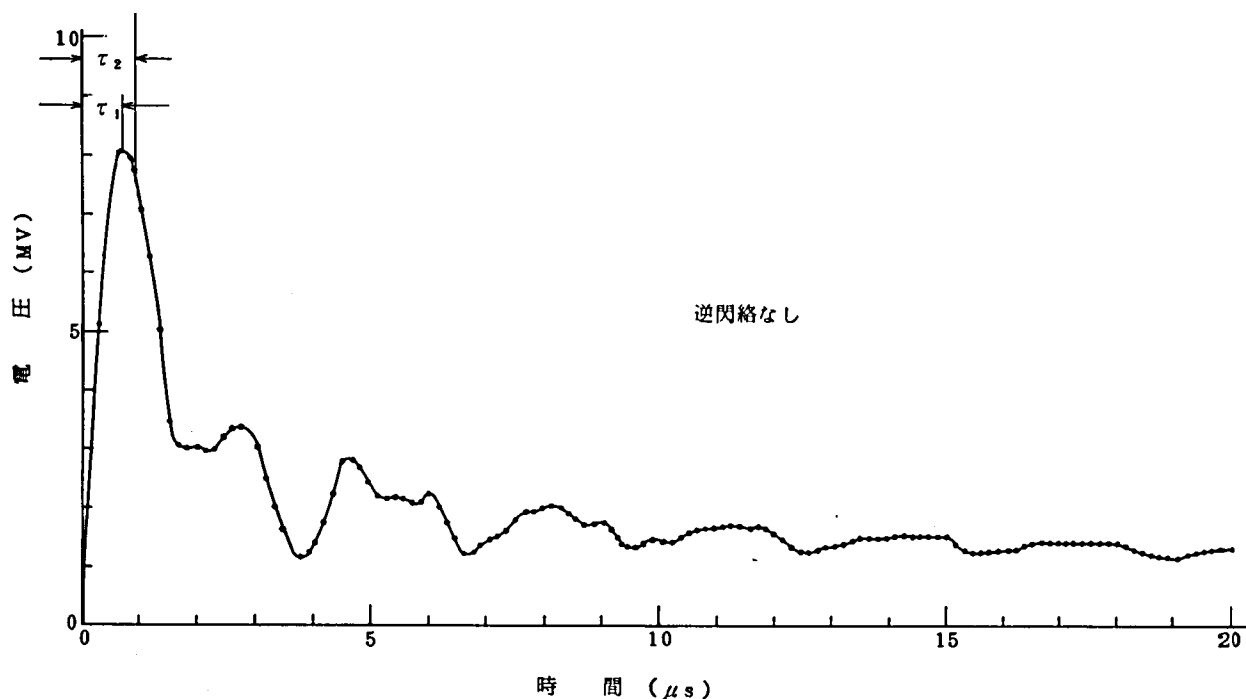
第 4.8 図は  $I_o = 200 \text{ kA}$  としたときの第 1 鉄塔の塔頂電位の計算結果で、塔頂電位はまず  $Z_{Tu} = 56 \Omega$  および架空地線のサージインピーダンス  $Z_G = 370 \Omega$  および雷道インピーダンス  $400 \Omega$  と雷撃電流の立ち上り峻度に従って急激に上昇する。従って、鉄塔におけるサージが塔頂からしゃへい線の取付点の間を往復するまでの時間  $\tau_1$  における塔頂電位  $v_T$  は

$$v_T = \left[ \frac{1}{56} + \frac{2}{370} + \frac{1}{400} \right]^{-1} i_o(t) = 39 i_o(t) \quad (0 < t < \tau_1) \quad (4.3)$$

で与えられ、雷撃電流  $i_o(t)$  の増加に従い鋭い立ち上りで増加する。なお、 $\tau_1$  は塔頂からしゃへい線までの距離が  $90 \text{ m}$ 、サージの伝搬速度は光速としているので、 $\tau_1 = 2 \times 90 / 300$

$= 0.6 \mu s$  である。

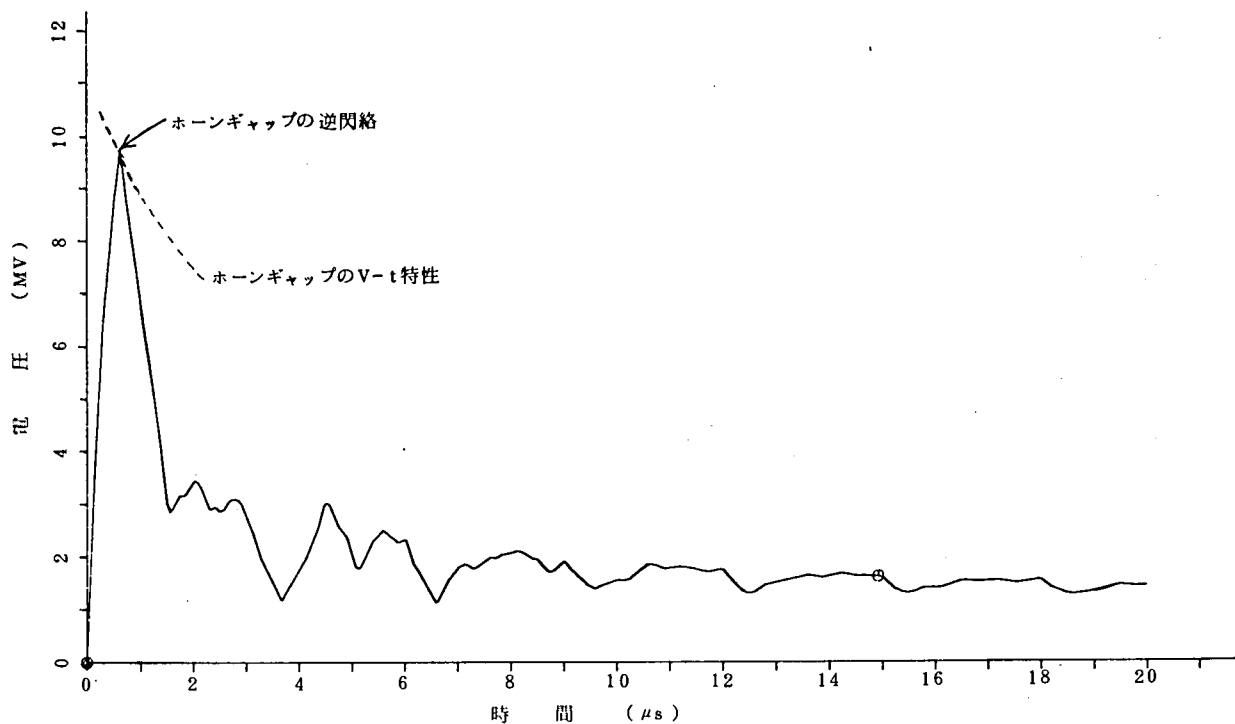
次に、しゃへい線の取付点より下をみた合成サージインピーダンスは、両側のしゃへい線のインピーダンスが  $Z_S = 130 \Omega$ 、鉄塔の下部インピーダンスが  $Z_{T\ell} = 124 \Omega$  であるから  $Z_{T\ell} \cdot Z_S / (2Z_{T\ell} + Z_S) = 43 \Omega$  となり、 $Z_{Tu}$  の  $56 \Omega$  より若干小さいので、取付点からは負の反射波が塔頂に帰ることになる。すでに 1.5 において述べたとおり、しゃへい線をもたない  $500 \text{ kV}$  以下の鉄塔では一般に  $Z_{Tu} < Z_{T\ell}$  であるため、 $Z_{Tu}$  と  $Z_{T\ell}$  との接合点から正の反射波が帰ってきて、塔頂電位の上昇率が増加し、逆閃絡を生じやすくなり、また鉄塔内の見掛けの伝搬速度も光速より遅くなる現象を生ずるのに対し、しゃへい線をもった UHV 鉄塔では、この点の事情が全く異なり、塔頂電位の上昇率はかえって抑えられるので、第 4.8 図の  $t = \tau_1$  においてみられるように、塔頂電位はゆるやかではあるが増加から減少にかわることとなり、逆閃絡も生じにくくなる。このことは、地上の電界強度低減の目的で設けられたしゃへい線が、本節の終りににおいてさらに具体的に述べるように、耐雷設計上からも効果をもっていることを示している。<sup>(53)</sup>



第4.8図 直撃雷による第1鉄塔の塔頂電位 ( $I_0 = 200 \text{ kA}$ )

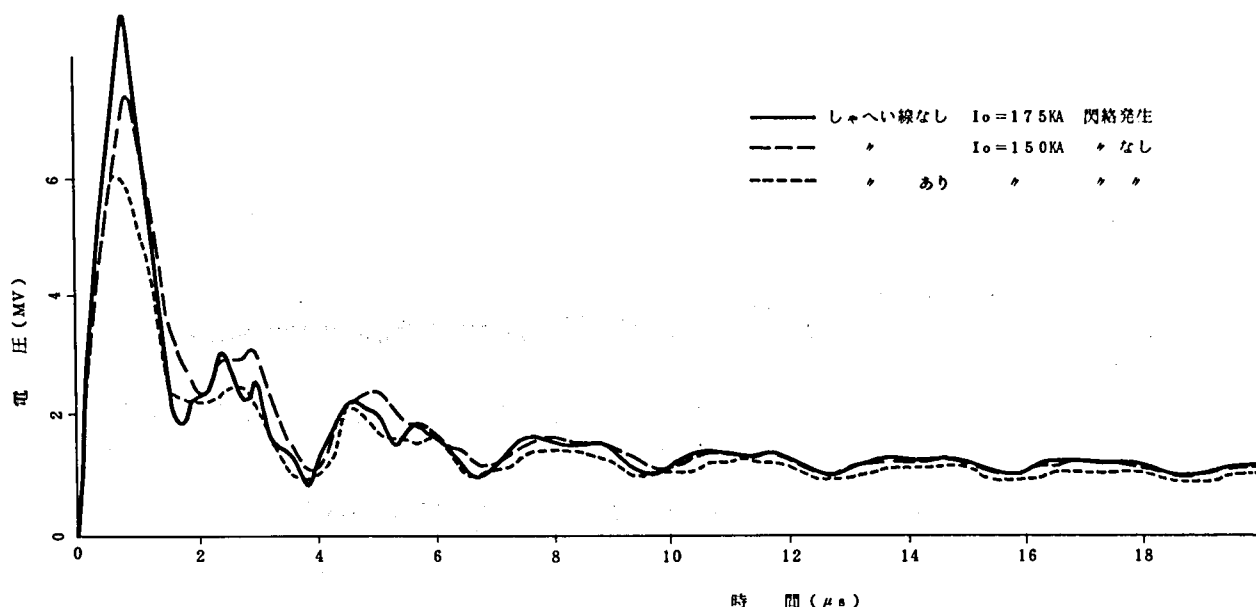
第 4.8 図の塔頂電位が急激に低下するのは、サージが塔頂から塔脚までを往復する時間  $\tau_2$  ( $\tau_2 = 2 \times 130 / 300 = 0.87 \mu\text{s}$ ) を過ぎた後であり、この間塔頂電位は非常に高い値に達し、第 4.4 図で示したホーンギャップの  $V-t$  特性と交叉すると逆閃絡を生ずることとなる。しかし、ホーンギャップの  $V-t$  特性も第 4.4 図からわかるように、 $1 \mu\text{s}$  以下においては閃絡電圧が急激に上昇するので、雷撃電流が十分大きくないと逆閃絡は発生しない。ここで想定した  $I_0 = 200 \text{ kA}$  では逆閃絡は発生しなかった。

次に、 $I_0 = 250 \text{ kA}$  とした場合には、塔頂電位は第 4.9 図となり、破線で示したホーンギャップの  $V-t$  特性と  $t \approx 0.59 \mu\text{s}$  において交差し、逆閃絡を生じている。この例からわかるように、UHV 鉄塔では、塔高が高く塔頂から塔脚間のサージの往復伝搬時間が長いため、逆閃絡はこの往復時間内に雷撃電流の波頭部で発生することとなるので、塔脚接地抵抗の値が逆閃絡にはあまり影響しないことを示唆している。この点も、 $500 \text{ kV}$  以下の鉄塔の雷サージ特性と異った事情となっている。<sup>(54)</sup>



第 4.9 図 直撃雷による第 1 鉄塔の塔頂電位 ( $I_0 = 250 \text{ kA}$ )

今回、想定したUHV鉄塔において、しゃへい線を除去した形状として解析した結果は第4.10図に示すとおり、しゃへい線がある場合の250kAよりかなり小さい雷撃電流である175kAで逆閃絡を発生したのでさきに述べたしゃへい線の耐雷設計上の有効性について確認することができた。

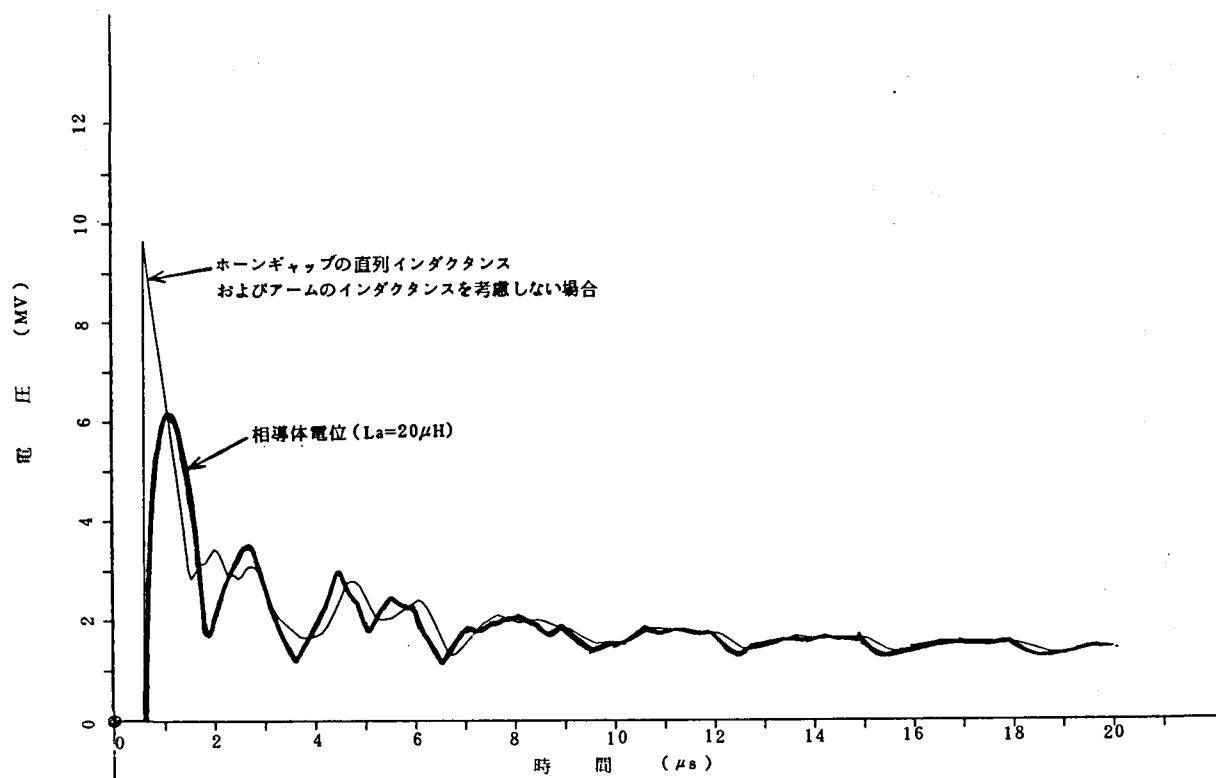


第4.10図 第1鉄塔の塔頂電位の比較

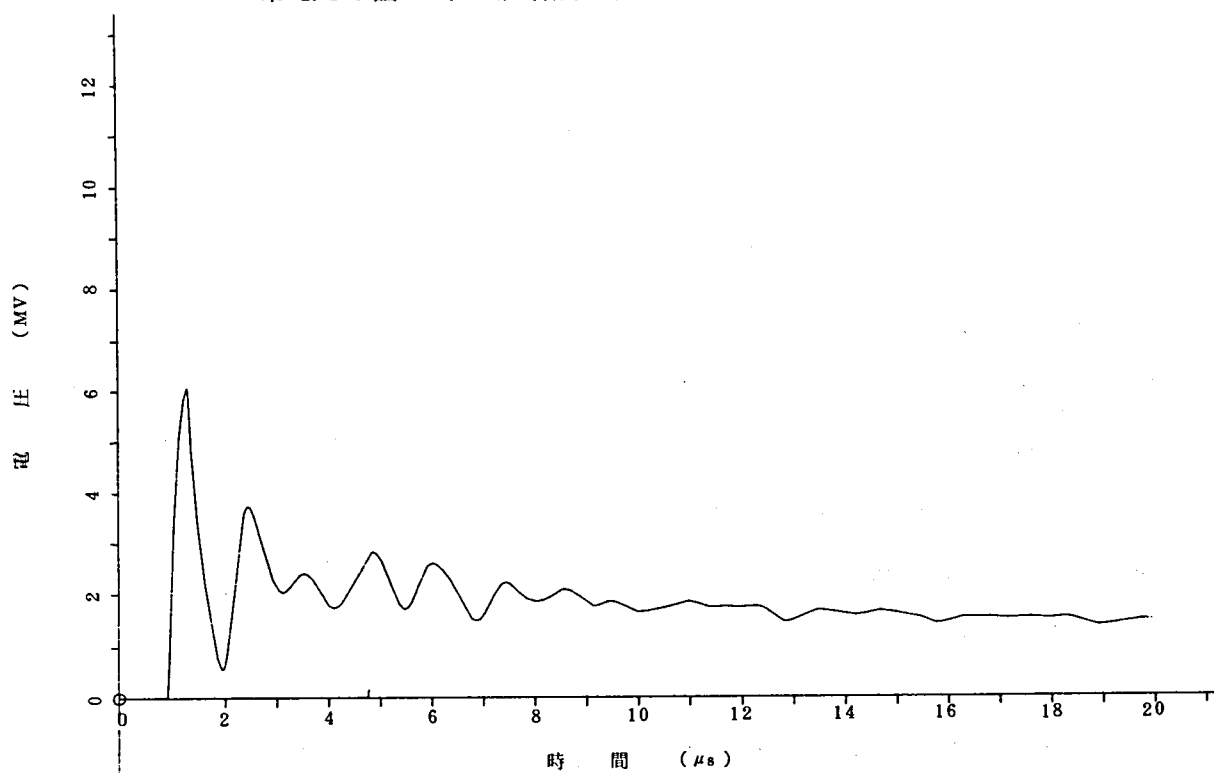
#### 4.4.2 GIS変電所への侵入サージ

第4.11図の太線は、第4.9図の逆閃絡によって相導体に発生するサージ電圧の波形で、逆閃絡電圧は第4.9図に示すように10MV近いにもかかわらず合計30μHのホーンギャップおよび腕金のインダクタンスによって、相導体のピーク値は6MV程度に低減され、立ち上りもなまっている。同図の細線は、これらのインダクタンスを無視した場合の相導体電位で、電流通路の直列インダクタンスが逆閃絡によって相導体に発生するサージ電圧に大きな影響をもっていることを示している。

第4.12図は第4.9図の逆閃絡によって引込鉄塔の相導体にあらわれるサージ電圧の波形である。立ち上り部は第1鉄塔の塔頂電位の波形と等しいが、サージインピーダンスの小さいGISからの負反射の影響が顕著にあらわれた波形となっており、また雷撃電流の波尾が長いいためサージ電圧の波尾は相当長く続いている。なお、ホーンギャップの閃絡は第1鉄塔以外の鉄塔では発生していない。



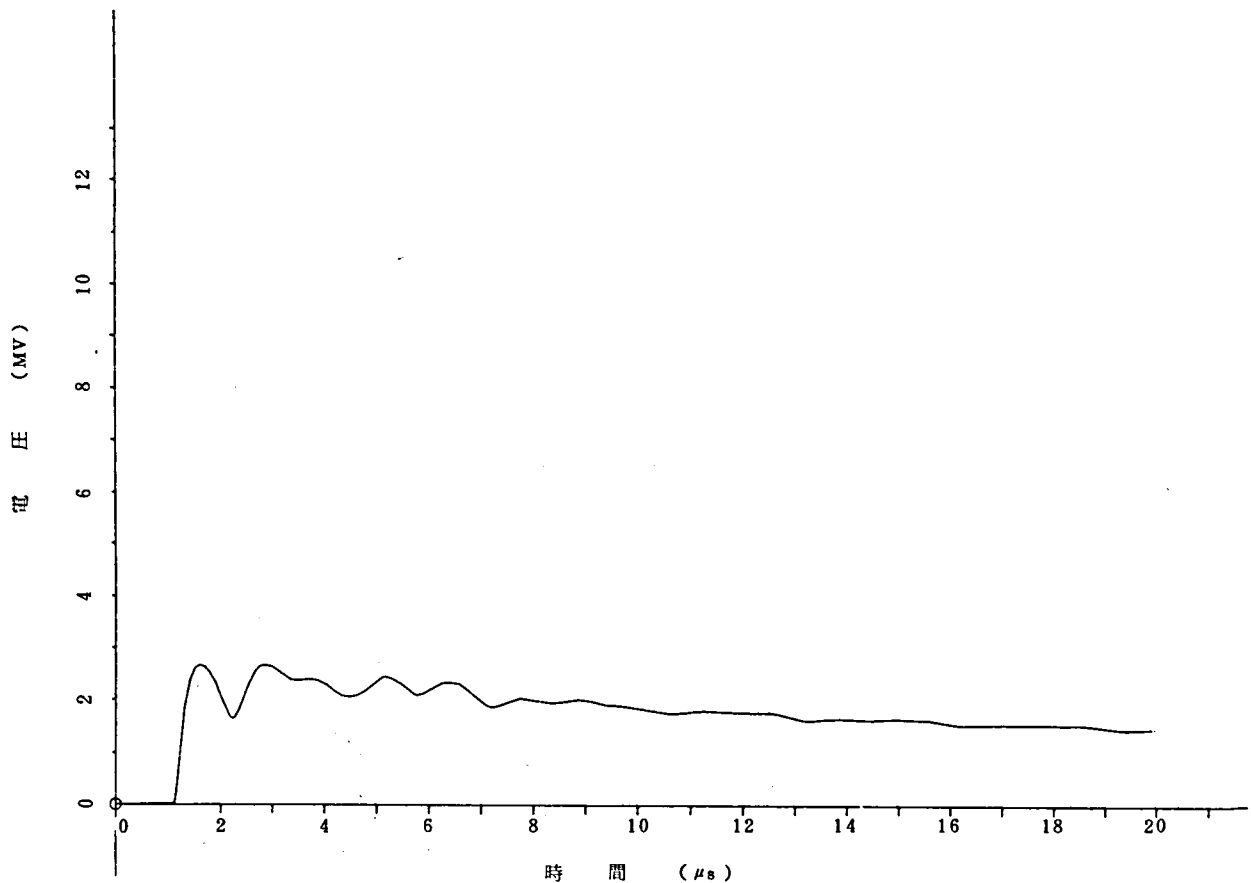
第 4.11 図 第 1 鉄塔点の相導体電位 ( $I_0=250\text{ kA}$ )



第 4.12 図 引込鉄塔点の相導体電位 ( $I_0=250\text{ kA}$ )

第4.13図はGISに侵入するサージ電圧波形で、波頭部の形状は立ち上りにおいては第4.12図とほぼ相似となっているが、波高値は大幅に低くなっている。また、波尾部も第4.12図のそれよりゆるやかな変化をしている。

波高値の低減は、架空線部相導体のサージインピーダンス $230\Omega$ に対して、GISのそれが約 $60\Omega$ と低いためで、このように侵入サージが必然的に低減されている。



第4.13図 GISへの侵入サージ ( $I_0 = 250\text{ kA}$ )

#### 4.5 侵入サージに影響する諸因子

4.2で述べた解析上の基本的条件を変えた場合、またGIS入口にZnO避雷器を設けた場合等のGISへの侵入サージを解析し、これに影響を及ぼす諸因子について検討した結果について述べる。

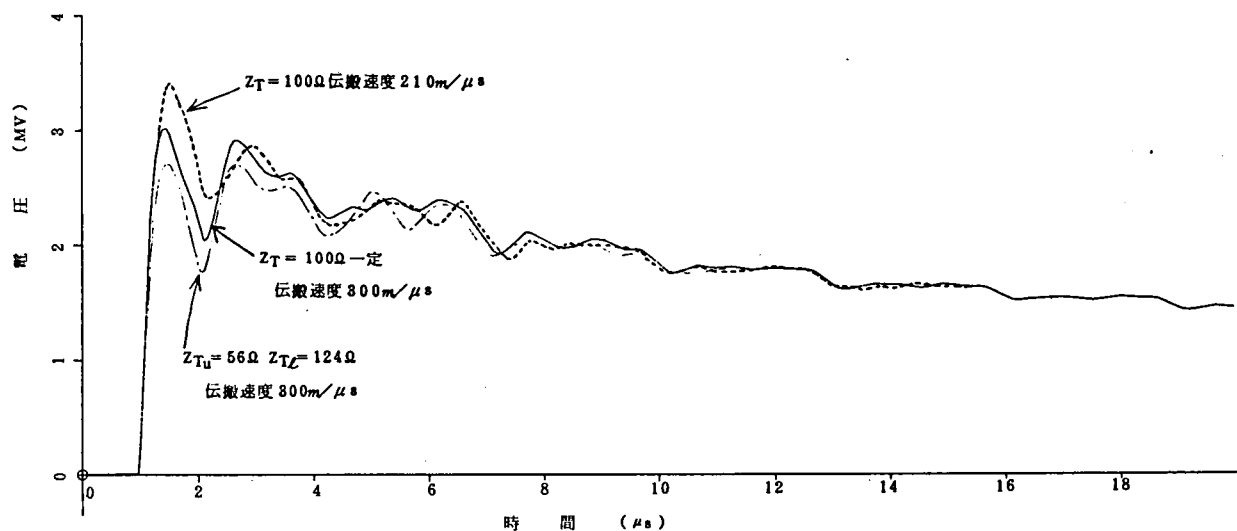
##### 4.5.1 鉄塔表現法の相違による影響

GISへの侵入サージについて、EMTPによる筆者の解析結果と従来どおり鉄塔のサージインピーダンスを単一の $100\Omega$ 、サージの伝搬速度を $210\text{ m}/\mu\text{s}$ とした場合の解析結



果を比較すると第4.14図のとおりである。なお図中には参考のため、伝搬速度のみを光速とした場合についても示した。この図から、従来の考え方では、塔頂電位の上昇はサージインピーダンスが異なることによるものおよび伝搬速度が遅くなることによるものがともに高目となり、両者が相俟ってGISへの侵入サージとして約30%高くなっている。

これと関連して、逆閃絡を生ずる雷撃電流の大きさは当然小さい値となるなど鉄塔表現法の相違による影響はかなり大きい。

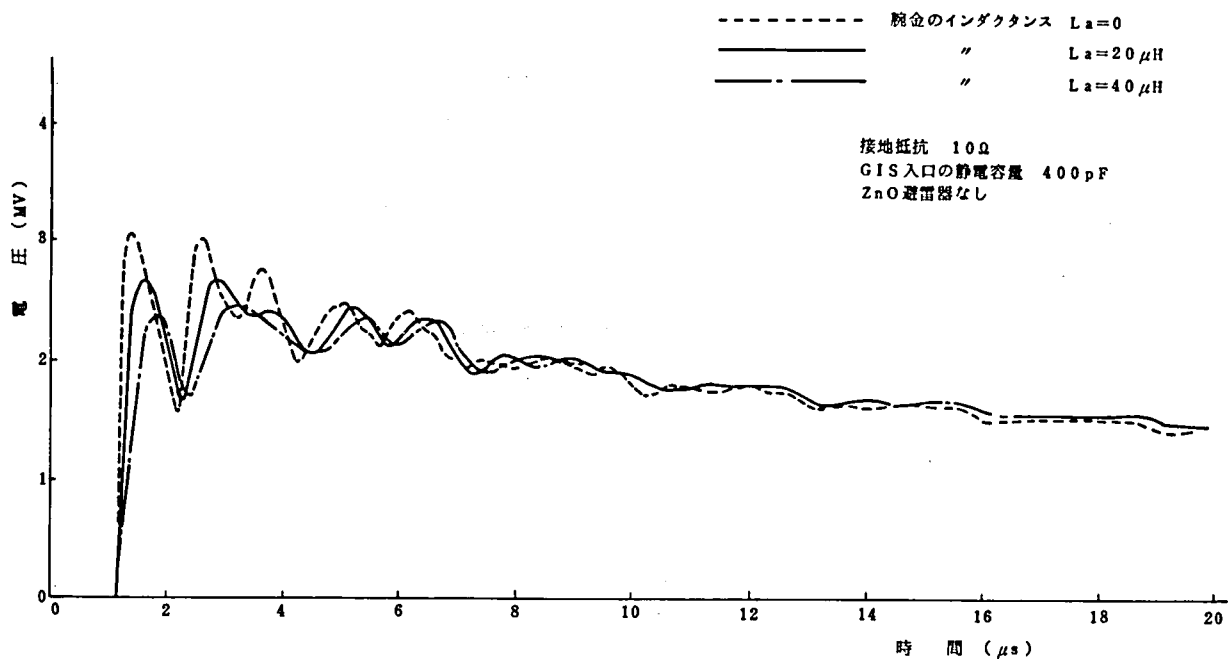


第4.14図 鉄塔表現方法の相違によるGISへの侵入サージ計算例 ( $I_0 = 250 \text{ kA}$ )

#### 4.5.2 鉄塔腕金のインダクタンス

鉄塔腕金およびホーンギャップ放電時のインダクタンスが侵入サージの波高値および波頭峻度に大きい影響をもっていることは第4.11図においても示したが、さらに鉄塔腕金のインダクタンス  $L_a$  を0、20、40  $\mu\text{H}$  と変えた場合の影響を検討した。

第4.15図はこの場合の計算結果で、侵入サージの波頭峻度は時定数  $L_a / (\text{架空地線、雷道と鉄塔からきまるインピーダンス} + Z_p / 2)$  の影響をうけて緩和され、波高値も初期の数  $\mu\text{s}$  の範囲では  $L_a$  の値により大きな影響をうける様子をよく示している。なお、波頭峻度の緩和がZnO避雷器の効果に及ばず影響については、後の4.5.6において述べる。



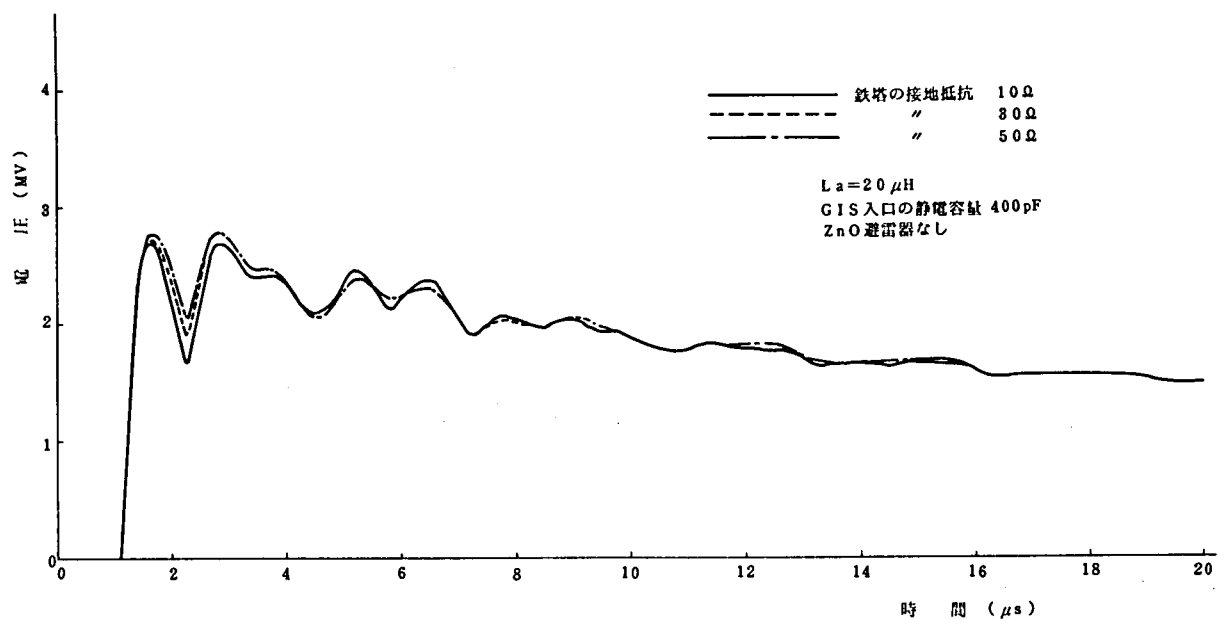
第 4. 15 図 鉄塔腕金のインダクタンスによるGISへの  
侵入サージの変化 ( $I_0=250\text{ kA}$ )

#### 4. 5. 3 塔脚接地抵抗

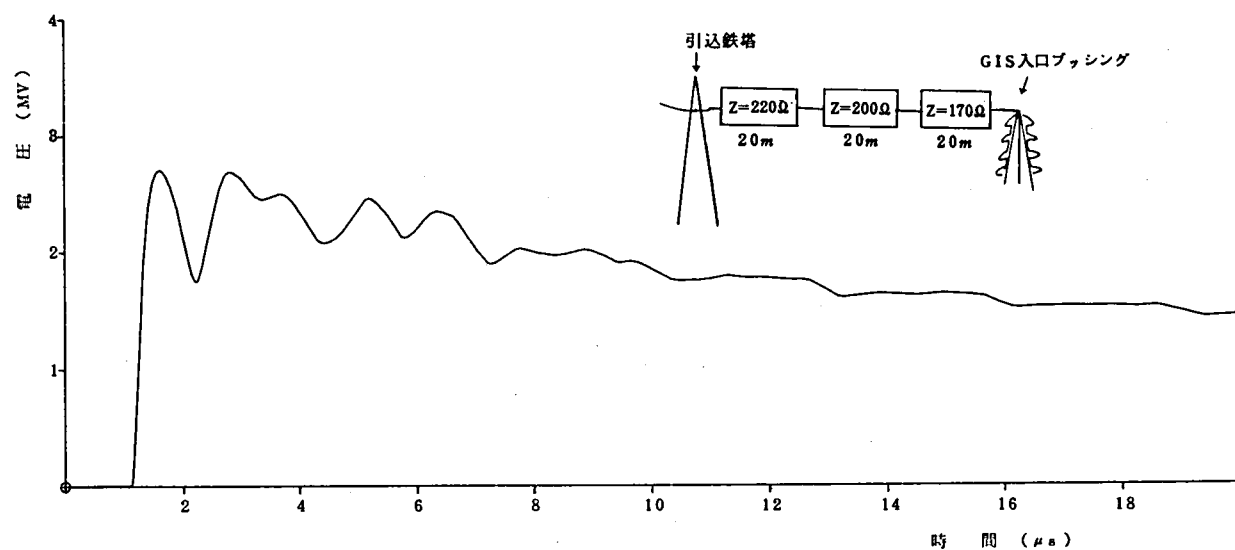
第 4. 16 図は第 1 鉄塔から第 5 鉄塔までの接地抵抗を  $10\Omega$ 、 $30\Omega$ 、 $50\Omega$  と変えた場合のGISへの侵入サージを比較したもので、ほとんど影響がないことを示しており、4. 4. 1で述べた推察とよく合っている。

#### 4. 5. 4 引込鉄塔からの引込線

引込鉄塔からGIS入口のブッシングまでの間は、送電線の引込線の高さが低くなるに従い、サージインピーダンスも徐々に小さくなるので、サージインピーダンスの低いGISとの急激なインピーダンスの変化がさけられ、GISへの侵入サージが反射の少ないなめらかな波形になることが期待される。引込線のサージインピーダンスは相導体の等価半径を  $r_c$  とすると、任意の地上高  $H$  に対して (1. 8) 式によって変化するが、第 4. 17 図はこれを図中に示したように 3 分割して表現しGISへの侵入サージを解析した結果である。これを第 4. 13 図と比べてもあまり大きな変化はなく、引込線による効果は期待する程ではなかった。



第 4. 16 図 鉄塔の接地抵抗による GIS 侵入サージの変化  
 ( $I_0 = 250 \text{ kA}$ )

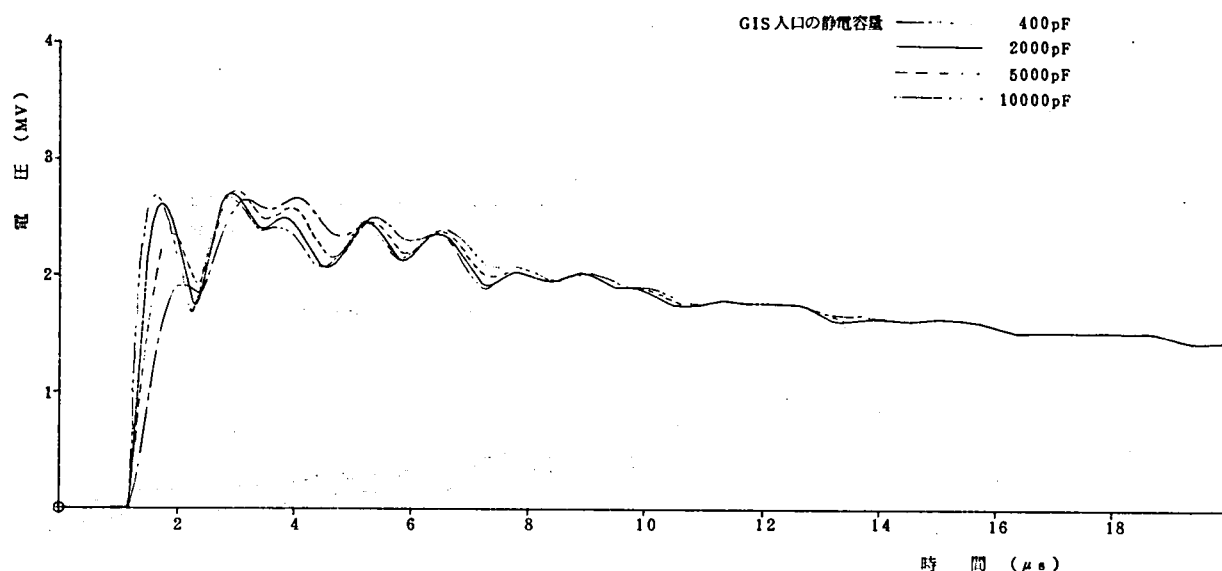


第 4. 17 図 ブッシングへの引込線のサージインピーダンスの変化を  
 考慮した場合の GIS への侵入サージ ( $I_0 = 250 \text{ kA}$ )

#### 4.5.5 架空線とGISの接続部の静電容量

架空線とGISの接続部、すなわちGISの入口には、ブッシングが設けられるが、このほかに並列リアクトル等が設置された場合には、その対地静電容量のために、GISへの侵入サージの波高値が低く、波頭峻度がゆるくなる。

第4.18図は、この静電容量を400pF、2000pF、5000pF、10000pFと増加した場合の計算結果で、侵入波の第1ピークは静電容量の増大に伴って低くなるが、第2ピークはあまり影響をうけず、侵入サージの波高値低減に対しては、静電容量がブッシングの400pF程度あれば十分であることがわかった。しかし侵入サージの立ち上り峻度は静電容量の増加とともにゆるやかになるので、その値が数1000pF程度にもなれば、次節でものべるようにZnO避雷器によるサージ保護面からは有効となる。



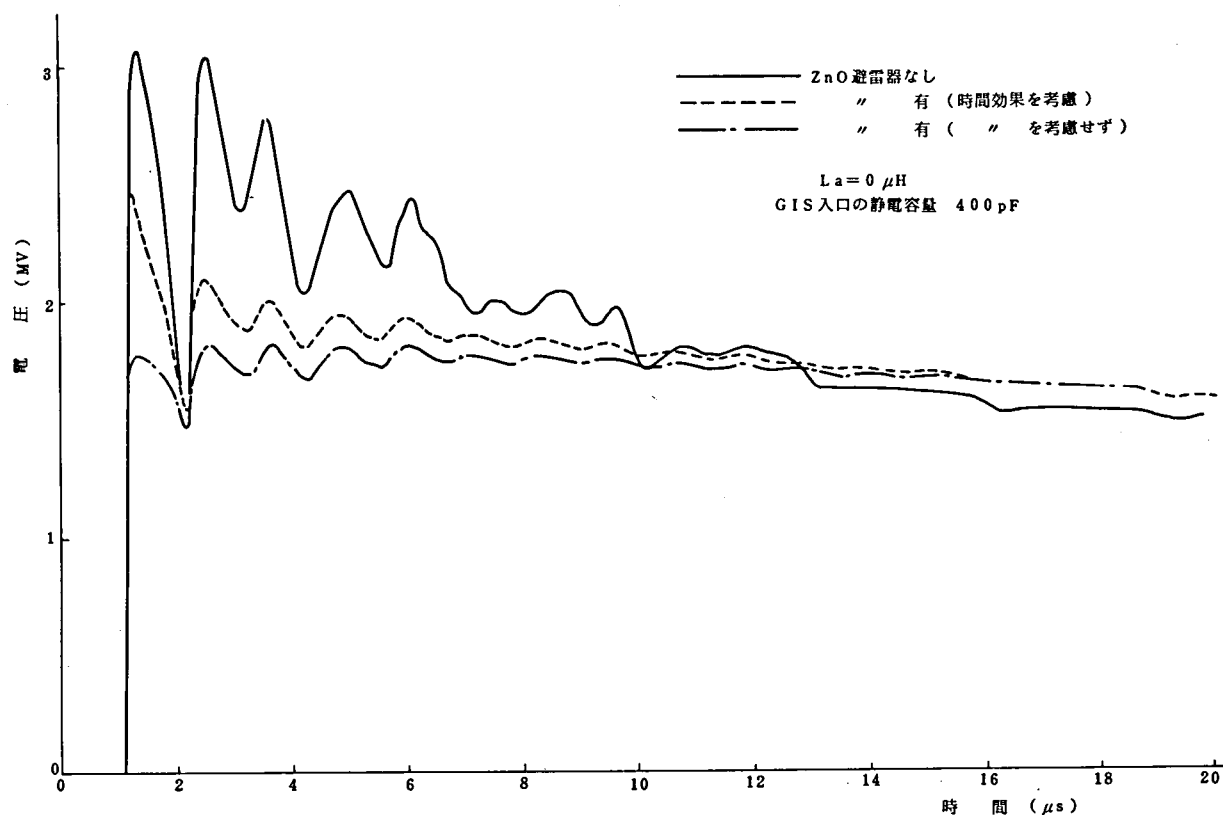
第4.18図 GIS入口の静電容量がGISへの侵入サージに与える影響 ( $I_0=250\text{ kA}$ )

#### 4.5.6 GIS入口に設けたZnO避雷器

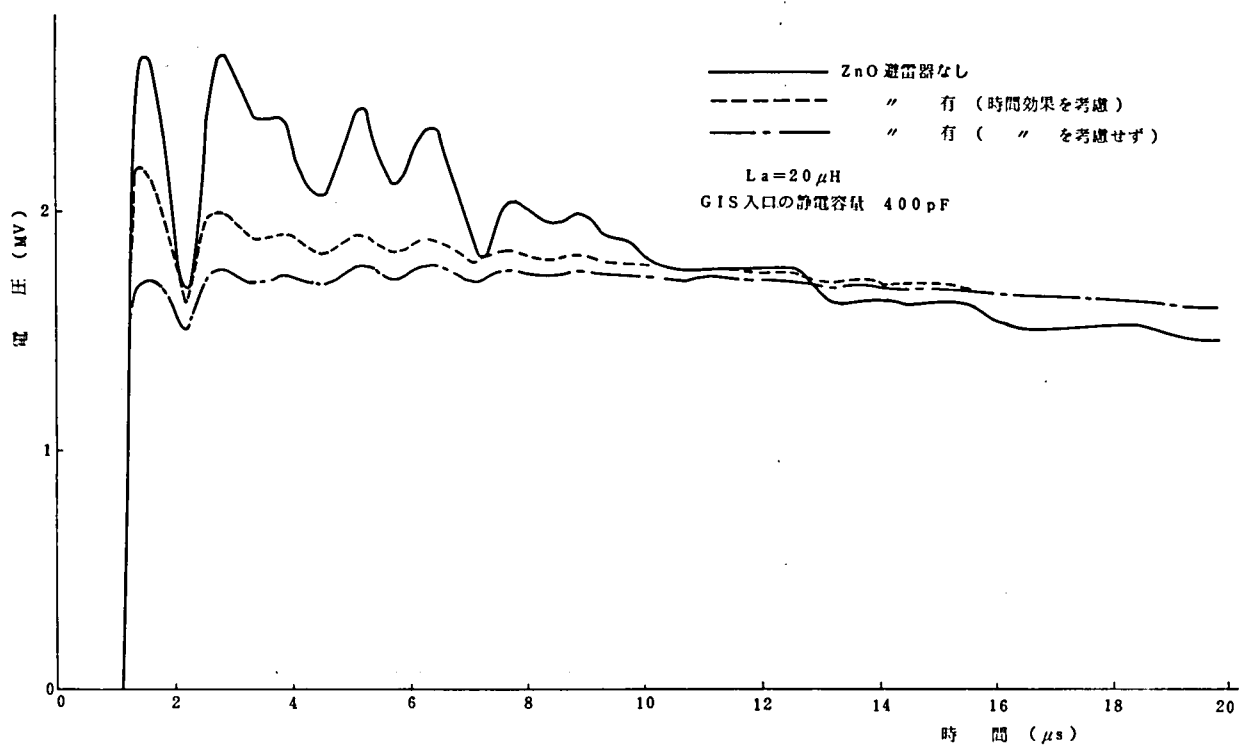
GISにZnO避雷器を適用した場合の詳しい解析については、第5章において述べるがここでは、逆閃絡による侵入サージの波頭峻度がZnO避雷器の時間効果、すなわちZnO避雷器のサージ保護効果に及ぼす影響について検討したものである。

侵入サージの波頭峻度は、鉄塔腕金のインダクタンス $L_a$ を0、20、40 $\mu\text{H}$ とすることにより変化させ、いずれの場合もZnO避雷器なし、ZnO避雷器を設置して時間効果を考慮した場合、同じく考慮しない場合の9ケースについて解析した。

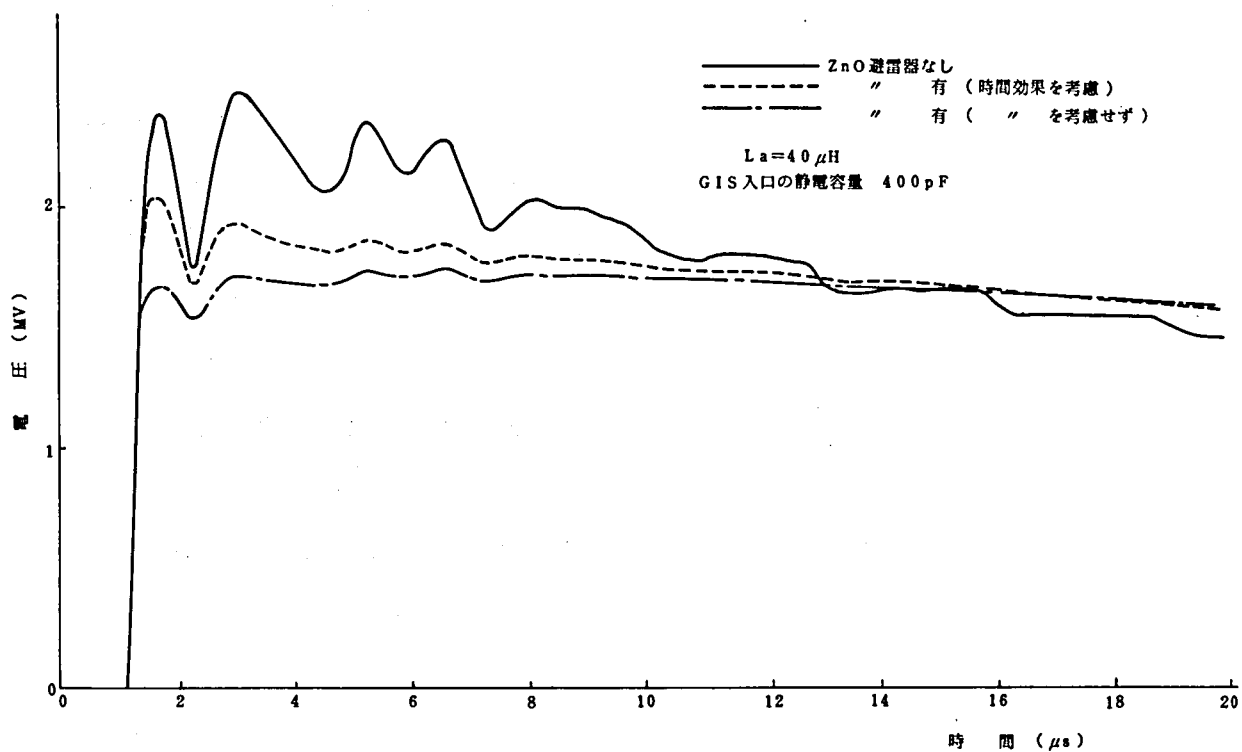
第4.19図～第4.21図は $L_a$ をそれぞれ0、20、40 $\mu\text{H}$ とした場合のGISへの侵入波形、第4.2表はこれらのピーク値をまとめた結果である。これらの結果によれば、20 $\mu\text{H}$ または40 $\mu\text{H}$ の $L_a$ を考慮することにより侵入サージの波高値は、考慮しない場合( $L_a=0$ )のそれぞれ82%、76%に低減され、さらにZnO避雷器によって17%以上低減されている。



第4.19図 GIS入口に設置したZnO避雷器による効果  
—鉄塔腕金のインダクタンスを0とした場合—



第 4. 20 図 GIS 入口に設置した ZnO 避雷器による効果  
 —鉄塔腕金のインダクタンスを  $20 \mu H$  とした場合



第 4. 21 図 GIS 入口に設置した ZnO 避雷器による効果  
 —鉄塔腕金のインダクタンスを  $40 \mu H$  とした場合

第4.2表 GIS入口に設けたZnO避雷器の効果

( )内は%

鉄塔腕金の インダクタンス ( $\mu\text{H}$ )	GISへの侵入波の電圧ピーク値 (kV)		
	避雷器なし	ZnO 避雷器あり (時間効果を考慮)	ZnO 避雷器あり (時間効果を考慮せず)
0	3 7 2 1 (100)	2 4 5 8 (75)	1 8 1 9 (56)
20	2 6 7 1 (82)	2 1 6 8 (66)	1 7 6 1 (54)
40	2 4 9 7 (76)	2 0 5 2 (63)	1 7 0 3 (52)

この場合、ZnO避雷器のV-I特性の時間効果を考慮した場合の侵入サージの波高値は、考慮しない場合に比べ、 $L_a$ により大きな影響をうけ、 $L_a=0$ の場合には20%程度高くなっているが、 $L_a=20\mu\text{H}$ 、 $L_a=40\mu\text{H}$ の場合はそれぞれ12%、11%であり、20 $\mu\text{H}$ 程度の $L_a$ の存在によりその差は10%程度と小さいものとなる。さらにUHV変電所では第5章において述べるように線路直付け分路リアクトルが設置されることによるGIS入口の対地静電容量も増加するほか、数個の避雷器が分散配置されるので耐雷設計の検討にあたっては、ZnO避雷器のV-I特性の時間効果の影響は考慮しなくても実用上の問題はない。

#### 4.6 500kV送電線から変電所へ侵入する雷サージ波形観測結果<sup>(55)(56)</sup>からの考察

##### 4.6.1 実系統における雷サージ波形の観測

実系統における雷サージの観測は過去にも多重雷の解明等を目的として一時的に行われたことがあるが、観測装置その他の条件が整わなかったこともあって、いたずらに労のみ多く満足な成果が得られないのが実状であった。

しかし、最近になってトランジェントレコーダその他の新しい自動記録装置等が急速に進歩してきたので、今回実施した観測は、これらを用い、500kV変電所において送電線から侵入する雷サージの波形を定常的に観測し、これから襲来の様相、雷害事故の原因等

を把握しようと世界にさがけて試みたものである。

勿論、開閉サージ等雷サージ以外の異常電圧についても自動記録される。

#### 4.6.2 観測装置の概要

第4.2.2図は観測システムの概要で、一般に電力系統の電圧測定は結合コンデンサや計器用変成器により分圧して行われるのが普通であるが、今回はこの種の分圧装置の使用は困難であるので、送電線の変電所への引込口で各相導体に並行して布設した水平アンテナ方式による簡易キャパシタンス形分圧器<sup>(57)</sup>による方式を採用している。このアンテナは前置増巾器を介して同軸ケーブルにより、加算倍率器、トランジェントレコーダ、記録装置へと順次接続されるがこの前置増巾器は、同軸ケーブル以降の各装置の入力インピーダンス $50\Omega$ とアンテナ側のインピーダンスのマッチングにも用いられている。

また、加算倍率器はアンテナが他相の電圧から受ける影響をベクトル演算操作により除去するために設けたもので、第4.2.2図(a)においてa、b、c相のアンテナ電位をそれぞれ $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$ 、倍率比を $P_{ij}$  ( $i=A\sim C$ ,  $j=A\sim C$ )、分圧比を $\nu$ とすると、次の関係式

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\nu} \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} \\ P_{BA} & P_{BB} & P_{BC} \\ P_{CA} & P_{CB} & P_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

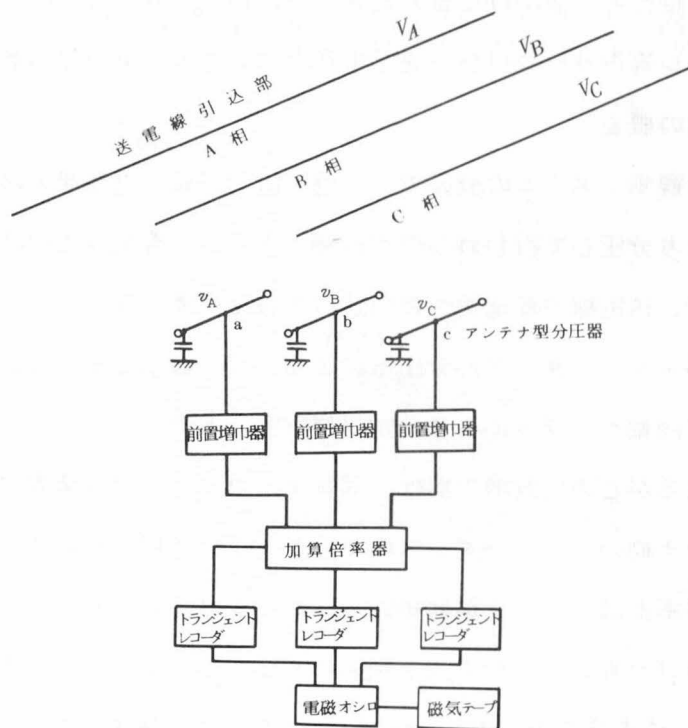
によって送電線の各相電位 $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 、を求めようとするものである。

雷サージが侵入すると、デジタル・コントローラが作動して、トランジェントレコーダにメモリし、その後自動的にフォト・レコーダに記録される全自動待機観測システムとなっている。

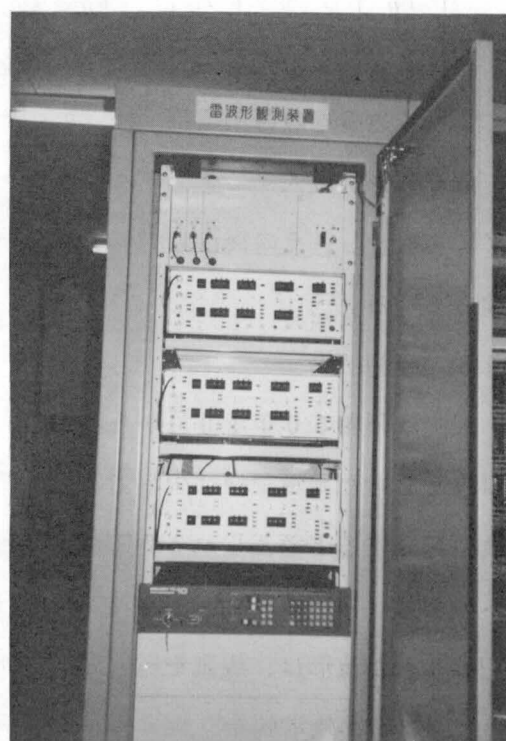
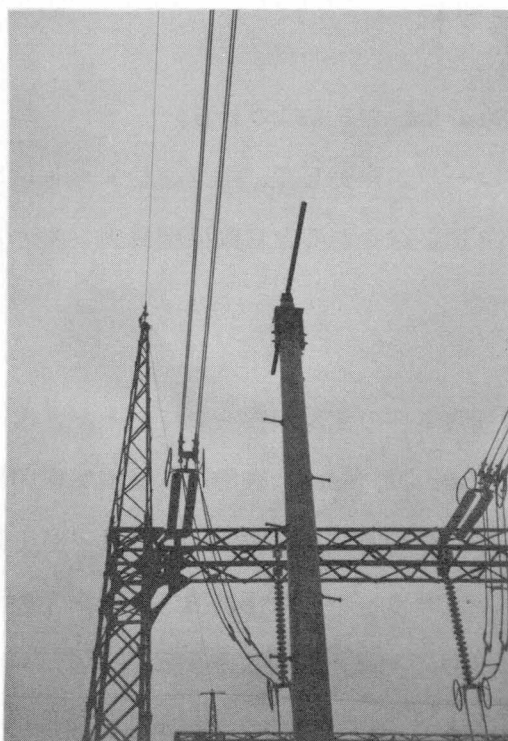
#### 4.6.3 観測結果

観測は昭和50年10月から開始し、多数の異常電圧の記録が得られているが、送電線事故となった雷撃記録は少数である。第4.2.3図(a)、(b)、(c)は代表的な鉄塔雷撃逆閃絡事故に起因すると考えられる変電所への侵入サージ波形である。変電所引込付近の第1鉄塔への雷撃は皆無であるが、第4.2.3図(c)は変電所から800mの近傍鉄塔への記録である。記録された波形は、観測を行った変電所が架空母線式であるが、波形の立ち上り部においては閃絡時の鉄塔腕金、ギャップの直列インダクタンスの影響とみられる波形峻度に対する緩和がうかがえる。



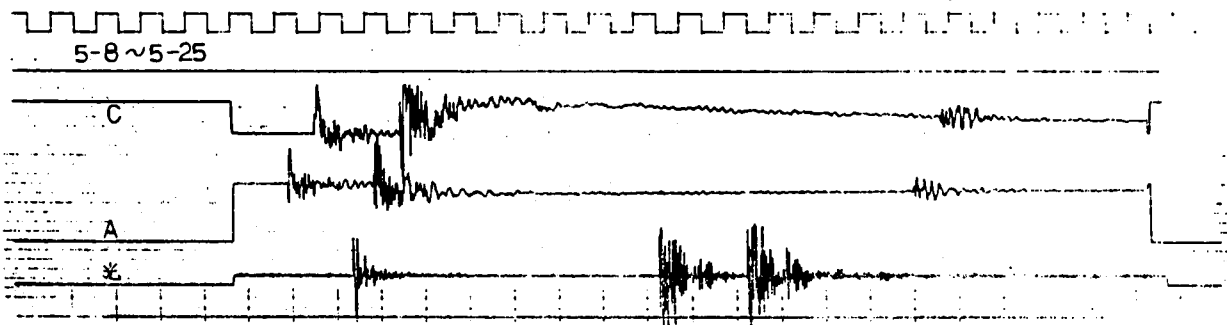


(a) 回路図

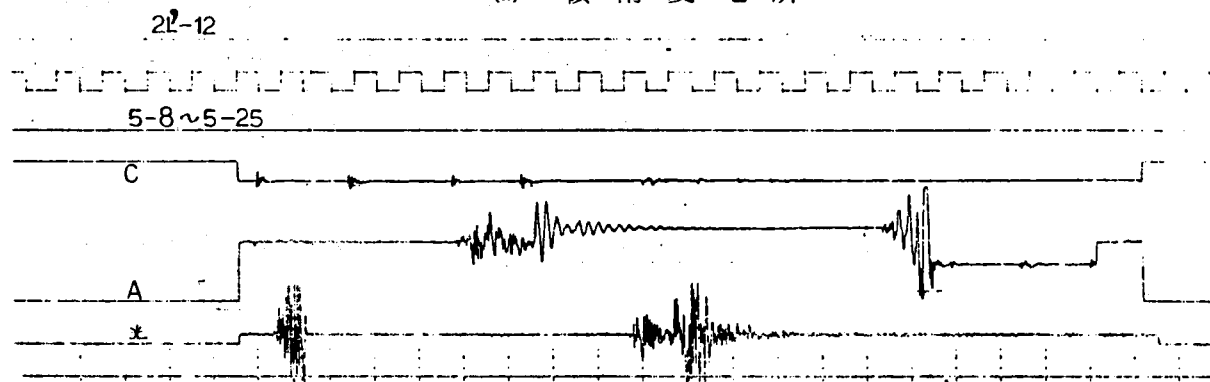


(b) アンテナ方式キャパシタンス分圧器 (左) と記録装置 (右)

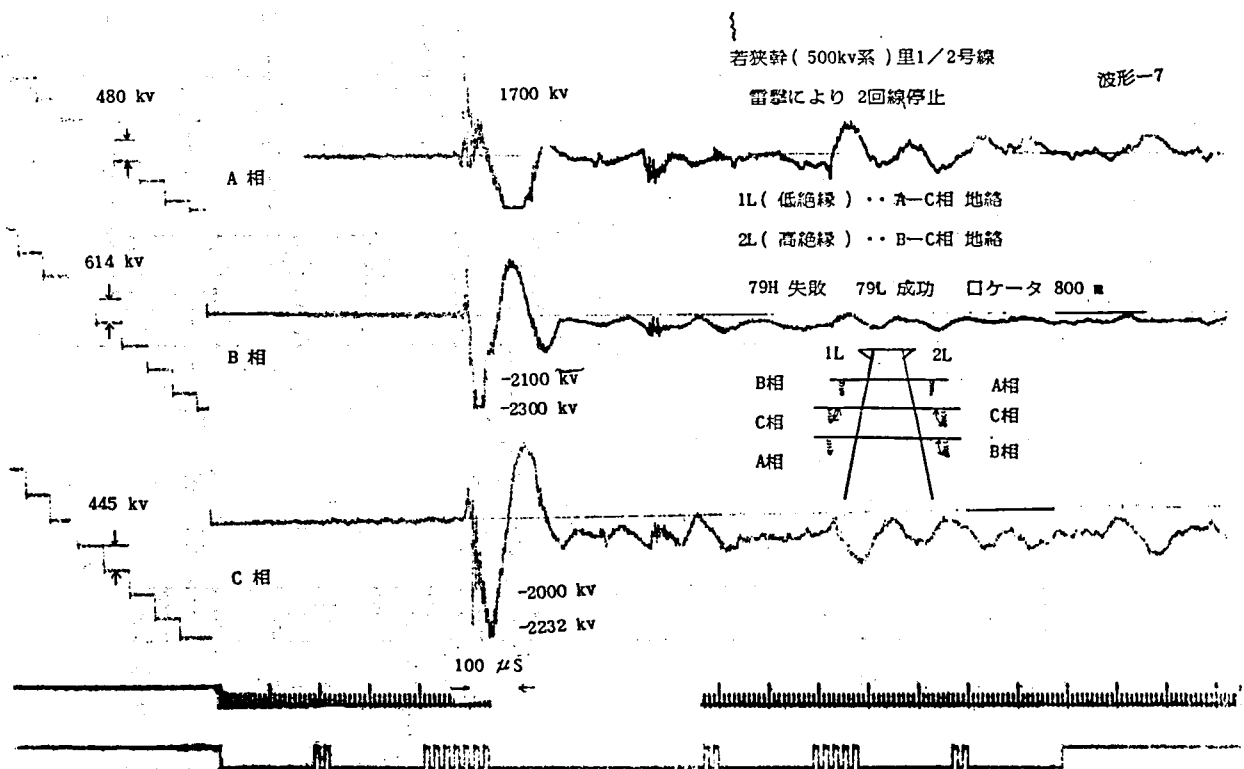
第4.22図 架空送電線から変電所へ侵入する雷波形観測装置の概要



(a) 嶺南変電所



(b) 嶺南変電所



(c) 京北開閉所

第 4. 2 3 図 架空送電線から変電所への侵入雷サージ波形例  
(鉄塔逆閃絡によると推定されるもの)

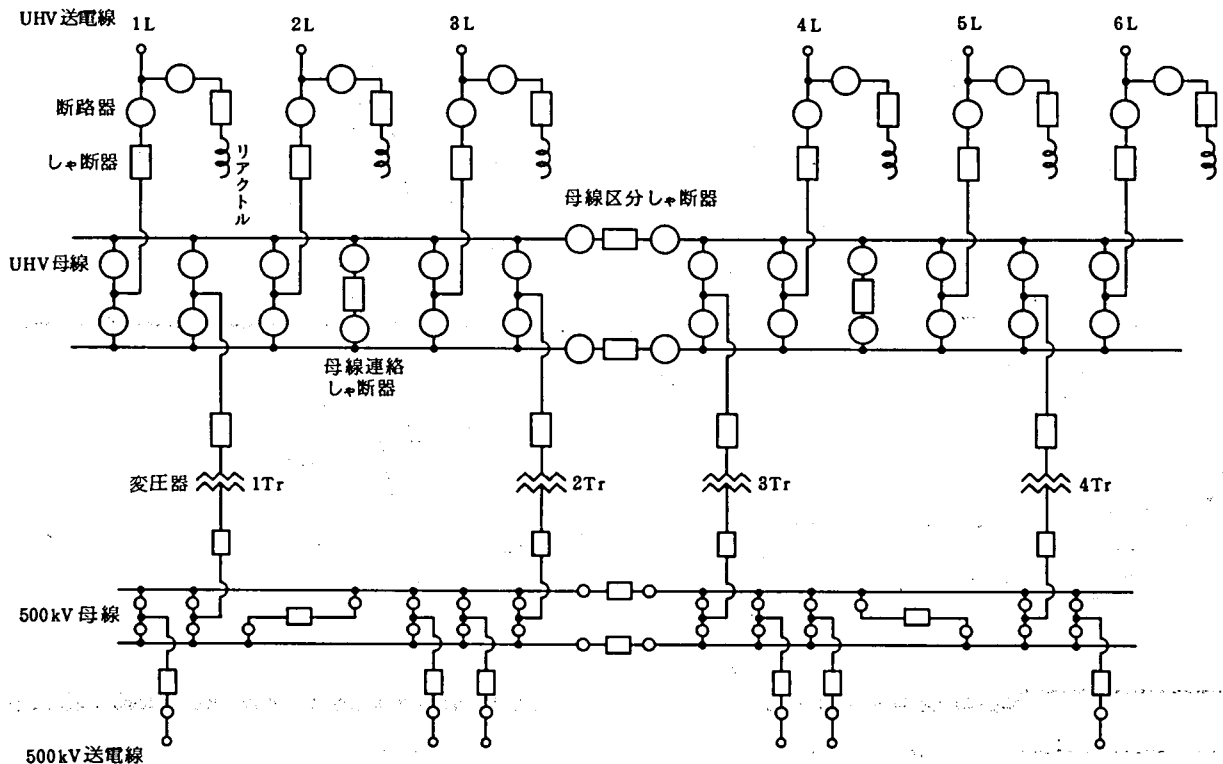
## 第5章 1200kV GIS変電所の耐雷設計

### 5.1 1200kV GIS変電所

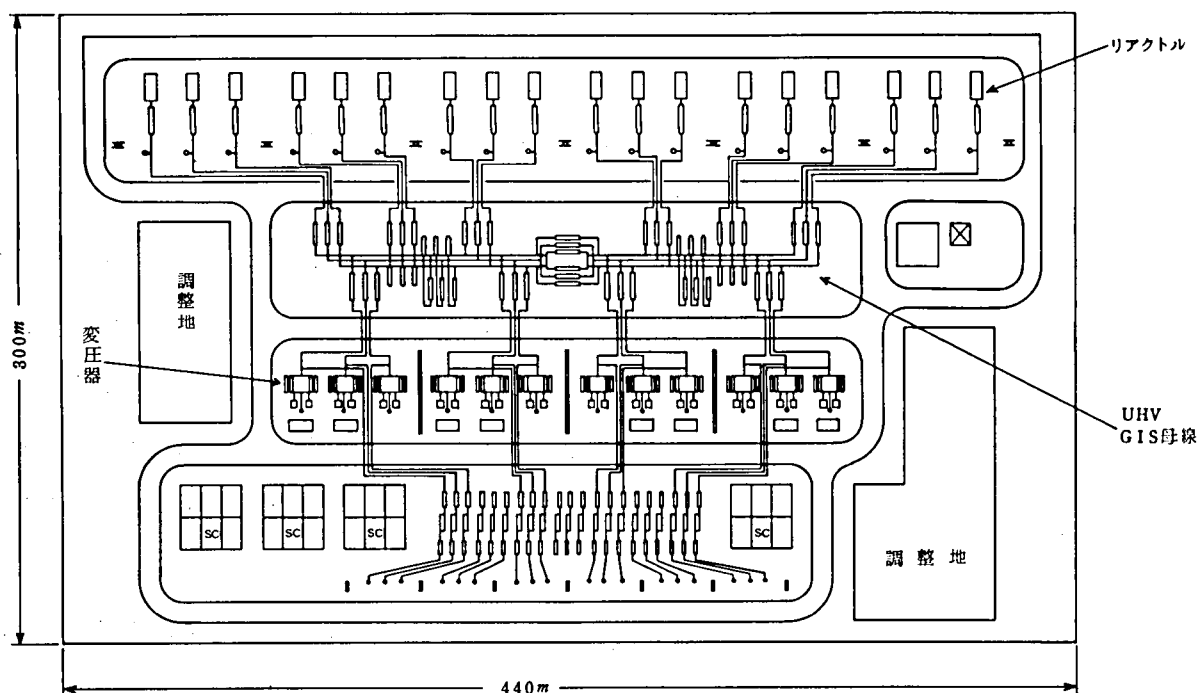
一般に、UHV変電所の標準的規模としては、UHV送電線6回線、UHV/500kV変圧器3000MVA 4バンク、500kV送電線6～8回線で、UHV側、500kV側とも開閉装置としてはGISを設置した変電所が考えられる。<sup>(58)</sup>

変電所の母線方式としては、種々の方式が考えられるが、ここでは第5.1図に示すように1200kV側母線は最も一般的な2重母線1シャ断器方式で各母線に母線区分シャ断器をもつ方式とした。第5.2図は機器配置図で、変電所の大きさは長さ440m×奥行300mである。なお、避雷器は適切な設置位置の探索が一つの課題でもあるため、これ等の図面では省略してある。

各送電線の引込口には、電圧抑制のために450MVAの線路直付け分路リアクトルが設置されている。〔付録-7〕



第5.1図 UHV変電所単線結線図



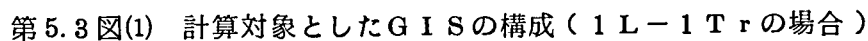
第 5.2 図 UHV 変電所機器配置図

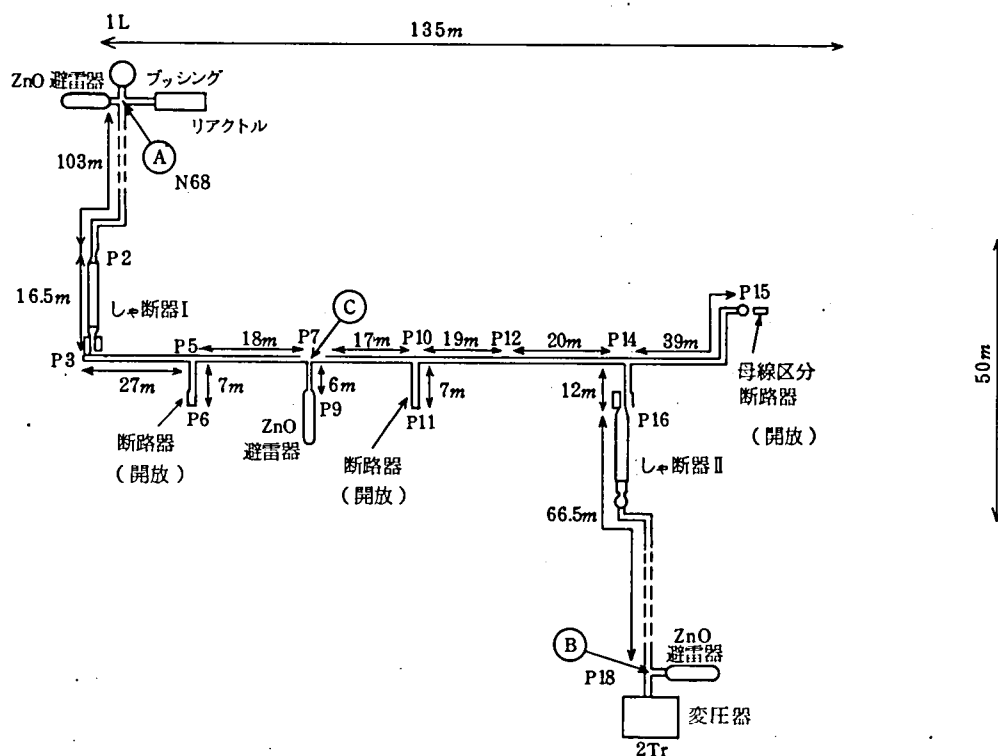
## 5.2 対象回路の選定

変電所の運転は、短絡容量その他系統上の制約がない限り、各送電線、各変圧器、各母線ともすべてが並列運転されるのが普通であるが、耐雷設計の解析検討にあたっては、送電線 1 回線、変圧器 1 バンクが母線に接続された状態とした。これは、一般に同一母線に接続される送電線の回線数、変圧器のバンク数が増加するほど、変電所内のサージ電圧が低くなる傾向があるので、上記の状態の場合が耐雷設計上最も過酷な解析結果を与えるからである。<sup>(59)</sup>

この場合、変電所は第 5.1 図に示すように、母線区分しゃ断器を介して左右対象の配置であるので、例えば送電線 (1 L) に母線を経て変圧器 (4 T<sub>r</sub>) を接続するように、母線区分しゃ断器の左側の送電線から右側の部分の変圧器に給電する、あるいはその逆の場合の運転形態については実際の運用上は考えられず、母線区分しゃ断器の左右いずれかの範囲内のみにおいて回路が構成され、不必要な区間の充電をさけるため、母線区分しゃ断器、同断路器も開放され、変電所のいずれか半分は停止されるのが普通である。サージ伝搬の検討に際しても、むしろこの状態の方が母線区分断路器端においても開放端の正反射が生ずるため過酷となり、また設計的にも避雷器は母線区分しゃ断器に対して左右対称の位置に設ける等の理由から、左右いずれかの範囲を対象としておけば十分である。従って、本章の解析では、母線区分しゃ断器の左半分から送電線 1 回線、変圧器 1 バンク、片母線を選定することにし

一般に、変電所の設計にあたって、その結線方式は系統構成上の要求から、また機器配置と据付間隔は送電線引込位置や建設、運転、保守上の関連から決まるので、結局、耐雷設計としては、変電所内のサージ電圧をもっとも効果的に抑制出来るような避雷器設置位置、設置個数等、避雷器適用方法を中心とした解析をすゝめ、対象とするGISの最低LIWLの一般的な値を求めることになる。従って、解析にあたっては、避雷器の効果が最も及びにくくなる回路、すなわち、サージ伝搬が最長となる回路を考慮しておく必要があるので、第5.1図において最左端の送電線(1L)の引込口からサージが侵入し、母線区分断路器までの母線の最長距離を伝搬するものとし、変圧器は同一母線に設置されている1Tr、2Trの2バンクのうち、いずれか1バンクが接続された2つのケースについて解析することにした。従って、回路は1Trまたは2Trのいずれを対象にするかにより、第5.3図(1)または(2)となるが、いずれの場合も送電線引込口からブッシングを経て分路リアクトルおよび長さ約100mのGIS分岐母線に接続され、しゃ断器を経て全長約140mのGIS主母線に結ばれる。また、変圧器側は、主母線からしゃ断器および長さ約50mのGIS分岐母線を経て接続される回路となる。なお、これらの図面は、① ② ③ 点に3個のZnO避雷器を設ける場合を例示したもので、また、図中のN、P等の記号は計算作業上便宜的につけた節点番号である。







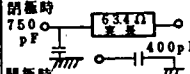
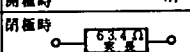
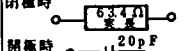
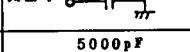
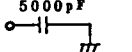
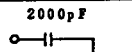
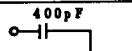
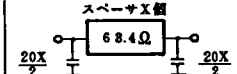
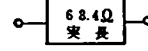
第 5.3 図(2) 計算対象としたGISの構成 ( 1 L - 2 Tr の場合 )

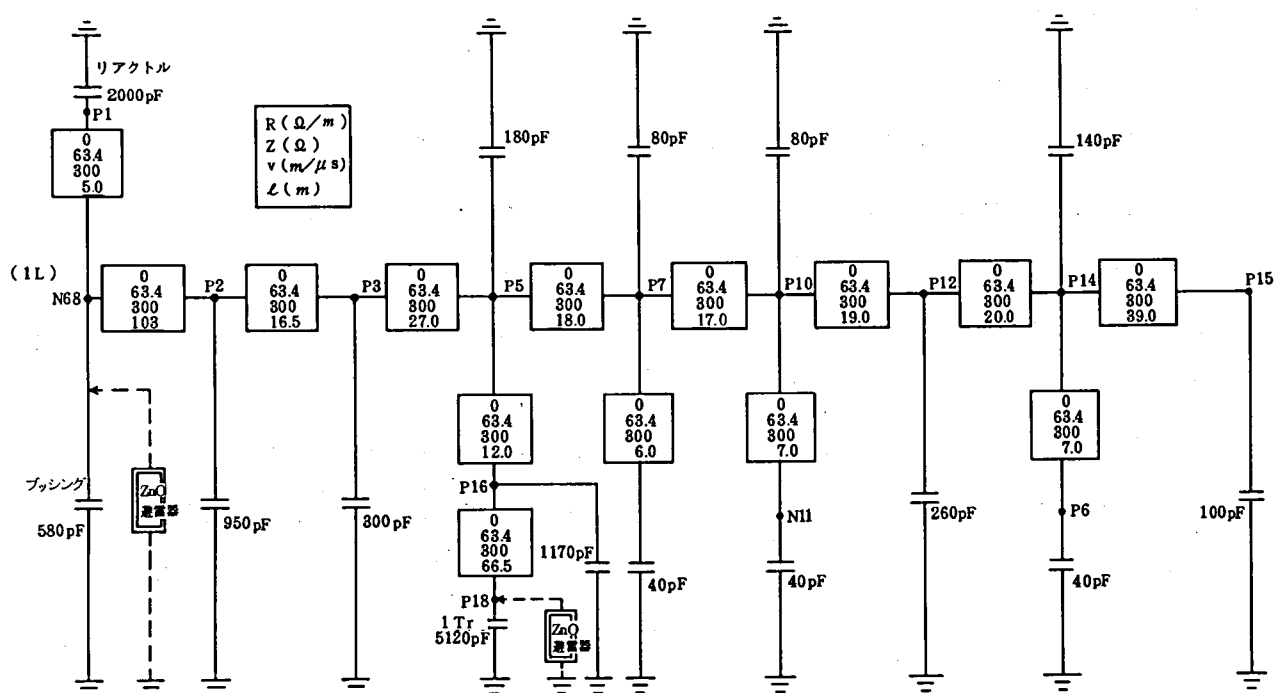
### 5.3 解析回路の構成

第 5.1 表は、UHV GIS の構成機器の仕様およびこれらを 3.2 で述べた方法によりサージ計算に必要な回路として表現した場合について示したもので、これを第 5.3 図(1)または(2)に適用して E M T P による解析回路を構成すると、それぞれ第 5.4 図(1)または(2)となる。鉄塔、ホーンギャップ、送電線等サージの侵入経路に関する解析回路図は、すでに第 4.7 図に示したので、雷撃地点の第 1 鉄塔から GIS を含めた全解析回路は、第 4.7 図において GIS と表現してある点線の枠内を第 5.4 図(1)または(2)によって置き換えたものとなる。

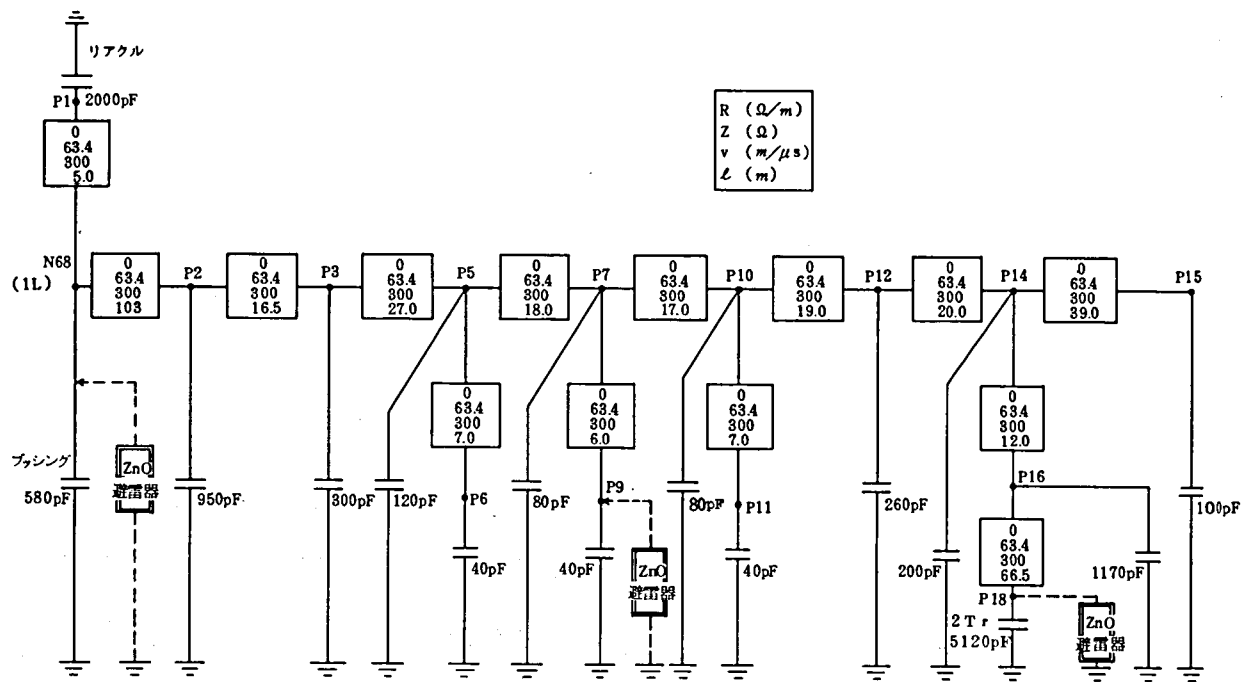
図中、点線で示した ZnO 避雷器は、この点に ZnO 避雷器を適用する場合の例示である。  
<sup>(60)(61)</sup>  
 ZnO 避雷器の V - I 特性としては、 $8 \times 20 \mu s$  のサージ電流に対して、第 5.5 図の実線で P 特性として示している現在の技術で UHV 用として実現可能なものを基本とすることにし、さらに今後の進歩改良により実現が期待されている同図中の点線で F 特性として示されている場合についても検討を加えることにした。また、避雷器の最大許容サージ電流値は、  
<sup>(62)</sup>  
 UHV 用では複数個の ZnO 素子を並列使用して構成されるので、40 kA と考えることにした。

第5.1表 UHV GISの構成機器とその表現方法

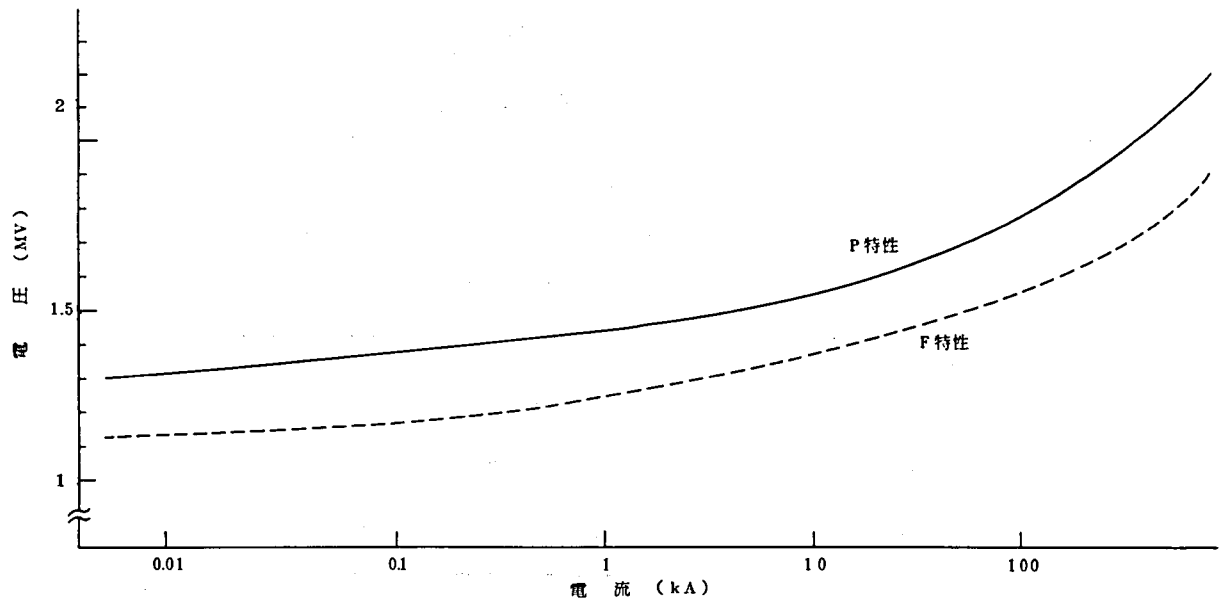
構成機器	主な仕様	サージ計算上の表現方法	回路
ガス絶縁主母線	定格電流 12kA	$Z=63.4\Omega$ , 減衰0, 伝搬速度=光速, 実物長の分布定数線路とする。	
ガス絶縁分岐母線	定格電流 8kA	同上	
しゃ断器	定格電流 12kA 6点切り	閉極時は, $Z=63.4\Omega$ とし, 等長の母線との容量差750pFを隣接節点に付加する。 開極時は対地容量400pFのコンデンサ終端とする。	閉極時  開極時 
断 路 器	定格電流 12kA	閉極時は母線の一部とする。 開極時は極間容量20pFを開放端と対地間に付加する。	閉極時  開極時 
変 圧 器	単相単巻形	対地容量5000pFのコンデンサ終端とする。	
リアクトル	単 相 形	対地容量2000pFのコンデンサ終端とする。	
ブ ッ シ ン グ	コンデンサ形	対地容量400pFを付加する。	
ス ペ ー サ	コ ー ン 形	20pF/個とし, 節点間の合計容量をその節点に集中して付加する。	スぺーサX個 
計器用変成器	増 幅 形	母線の一部とする。対地容量は無視する。	



第5.4図(1) UHV GIS電位分布解析回路(1L-1Trの場合)



第 5.4 図(2) UHV GIS 電位分布解析回路 (1L-2Tr の場合)



第 5.5 図 ZnO 避雷器の V-I 特性 (サージ電流  $8 \times 20 \mu s$ )

#### 5.4 解析 ケース

解析は、まず 1Tr が接続された第 5.4 図(1)を対象として行うことにし、最初に避雷器が設置されていないケースから始めた。このケースは効果的な避雷器設置の探索のための基本として重要なものである。



次いで、この結果を参考として避雷器1個を設置したケースを解析し、順次、避雷器個数を増加したケースへと解析を進めた。

次いで、2Trが接続された第5.4図(2)の回路について、全く同様の解析を行い、各ケースについて両者を比較し、所内のサージ電圧が高目となる過酷側の回路から避雷器設置位置とLIWLの低減限界値を求めた。

また、上記の結果に基づいて、避雷器がF特性に向上した場合の効果を解析し、最後にZnO避雷器適用上の考察をも含めて総合評価を行った。解析ケースを結果的に示せば、第5.2表となる。

第5.2表 1200kV GIS変電所に対する耐雷設計計算ケース一覧表

避雷器P特性	ケース番号	
避雷器設置位置	1Trが接続された回路	2Trが接続された回路
なし	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>
変圧器端	Ⅰ <sub>1</sub>	Ⅰ <sub>2</sub>
GIS入口	Ⅱ <sub>1</sub>	Ⅱ <sub>2</sub>
GIS入口、変圧器端	Ⅲ <sub>1</sub>	Ⅲ <sub>2</sub>
GIS入口、変圧器端、母線区分断路器	V <sub>1</sub> - P <sub>15</sub>	V <sub>2</sub> - P <sub>15</sub>
〃 〃 母線上節点P <sub>12</sub>	V <sub>1</sub> - P <sub>12</sub>	V <sub>2</sub> - P <sub>12</sub>
〃 〃 P <sub>10</sub>	V <sub>1</sub> - P <sub>10</sub>	V <sub>2</sub> - P <sub>10</sub>
〃 〃 P <sub>7</sub>	V <sub>1</sub> - P <sub>7</sub>	V <sub>2</sub> - P <sub>7</sub>
〃 〃 P <sub>3</sub>	V <sub>1</sub> - P <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> - P <sub>3</sub>
〃 〃 母線区分断路器と節点P <sub>3</sub>	V <sub>1</sub> - P <sub>3</sub> - P <sub>15</sub>	—



上記の解析結果から、過酷側の回路および避雷器最適位置を選定



避雷器F特性	ケース番号
避雷器設置位置	○、□はP特性の解析結果から選出する。
なし	I'○
変圧器端	Ⅰ'○
GIS入口、変圧器端	Ⅱ'○
GIS入口、変圧器端	Ⅲ'○
GIS入口、変圧器端、母線上の最適位置	V'○ - P□

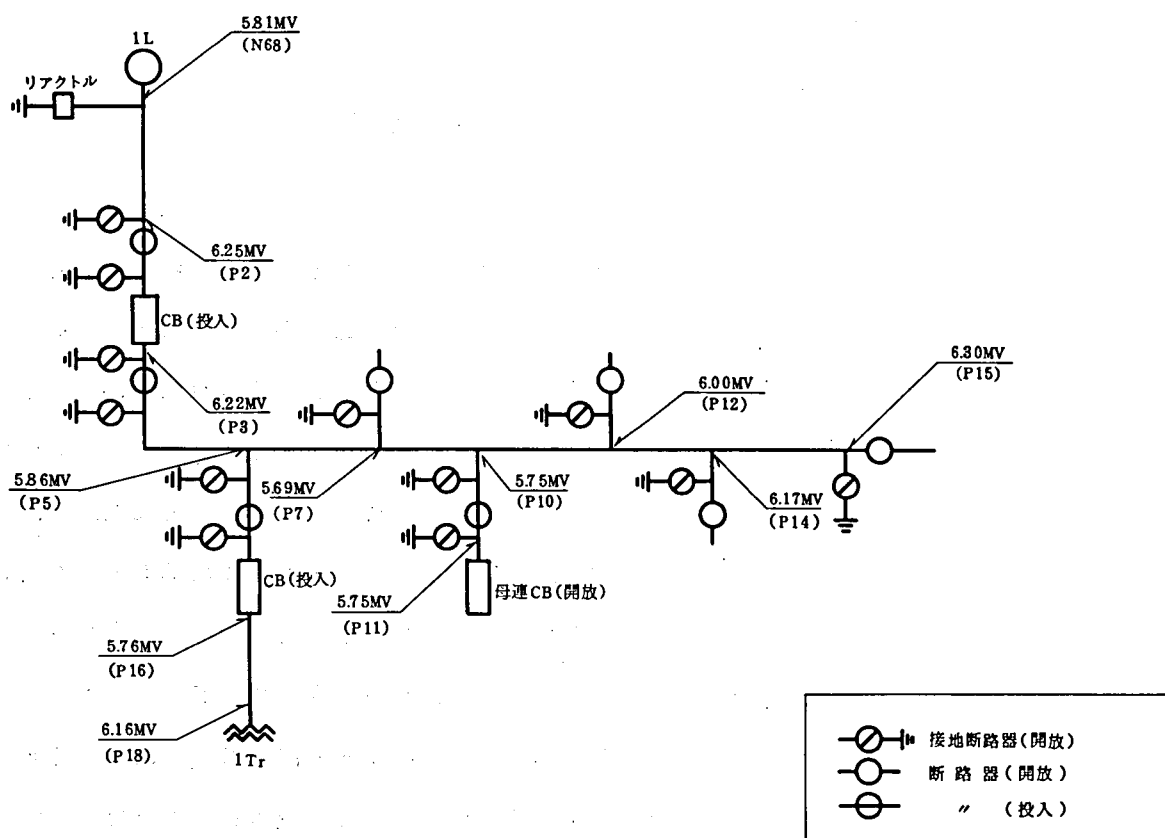
備考：結果として○は1、□は3となった。

## 5.5 解析結果

### 5.5.1 1 Tr が接続された回路の解析結果

#### (1) 避雷器なしの場合（ケース I<sub>1</sub>）

第 5.6 図はこのケースにおける各節点のピーク値を示したもので、系内の最高ピークは母線区分断路器開放端（P<sub>15</sub>）における 6.30 MV であるが、変圧器端（P<sub>18</sub>）、線路側シャ断器線路端（P<sub>2</sub>）においてもそれぞれこれに近い 6.16 MV、6.25 MV となっている。GIS 入口（N<sub>68</sub>）等その他の節点ではいずれも 6 MV 以下である。



第 5.6 図 各接点の電圧ピーク値

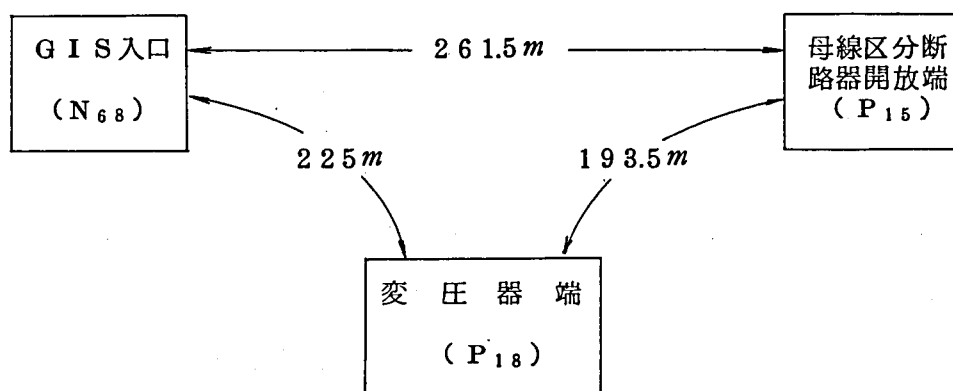
系内におけるサージの大きな反射は、変圧器端（P<sub>18</sub>）と母線区分断路器開放端（P<sub>15</sub>）で生じ、GIS 入口（N<sub>68</sub>）とこれらの間の実長は第 5.7 図のとおりであるので、GIS 入口（N<sub>68</sub>）に帰ってくる系内からの反射波は ① N<sub>68</sub> → P<sub>18</sub> → N<sub>68</sub> ,

② N<sub>68</sub> → P<sub>15</sub> → N<sub>68</sub> , ③ N<sub>68</sub> → P<sub>18</sub> → P<sub>15</sub> → N<sub>68</sub> , ④ N<sub>68</sub> → P<sub>18</sub> → P<sub>15</sub> → P<sub>18</sub> →

N<sub>68</sub> の 4 つの経路となり、これらは系内の付加静電容量を考慮した見掛けのサージ伝

搬速度を  $240 \text{ m}/\mu\text{s}$  と仮定すると、それぞれ  $1.9 \mu\text{s}$  ( $\approx 225 \times 2 / 240$ )、

$2.2 \mu\text{s}$  ( $\approx 261.5 \times 2 / 240$ )、 $2.8 \mu\text{s}$  ( $\approx (225 + 193.5 + 261.5) / 240$ )



第5.7図 サージが伝搬するGIS内の実長

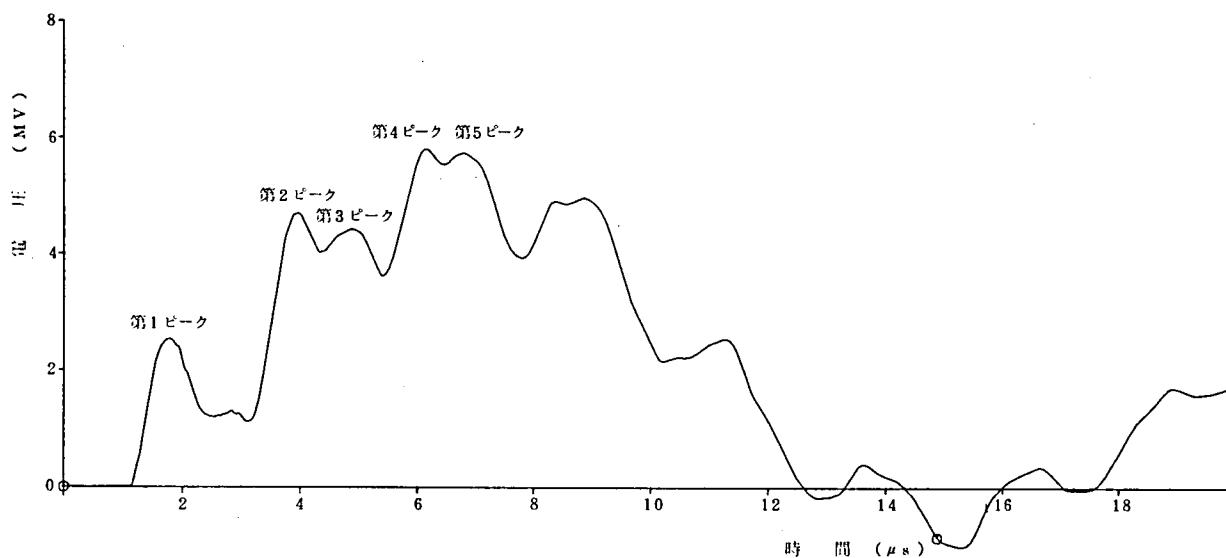
$3.5 \mu s$  (  $\approx (225 + 193.5) \times 2 / 240$  )後にそれぞれあらわれることとなる。しかし、実際にはこの等の反射波には互に重畳する部分があるので、このとおりそれぞれが明確なピークを形成した波形として現われる訳ではなく、合成されたものとなる。第5.8図(a)の解析波形によると、最初のピークは架空線とGISのインピーダンスの差から約2.51MVと低い値であるが、これより2.2 $\mu s$ 後の第2ピークでは上記の①および②が合成され、約4.71MVと急激に高い値となり、3.2 $\mu s$ 後の第3ピークでは③および④の合成されたピーク値約4.47MVを生じている。この第2、第3ピークは、それぞれさらに2.2 $\mu s$ 、3.2 $\mu s$ 後に第4、第5のピークを生じ、第4ピークでこの点の最高値5.81MVに達している。上記のとおり、GIS入口(N<sub>68</sub>)におけるピークが変圧器端(P<sub>18</sub>)等GIS内の他端からの反射によって形成されることは、避雷器による保護を考える場合、避雷器の設置位置はGIS入口ではなく、まずGIS内の他端であるべきことを示している。

線路用しゃ断器端(P<sub>2</sub>)では、変圧器端(P<sub>18</sub>)からの反射波、母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)からの反射波さらにこれらがGIS入口で正反射したもの等が相次ぎ、相重なって次第に高い電位になり、同図(b)に示すように第5ピークでこの点の最高値6.25MVに達している。

母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)では、主母線に沿って直接進んだサージ、変圧器端(P<sub>18</sub>)で反射した後、主母線に沿って進んだサージ、これらがさらにGIS入口で反射して生じたサージが重畳して次第に高い値になり、同図(c)のとおり第4ピークでこのケ

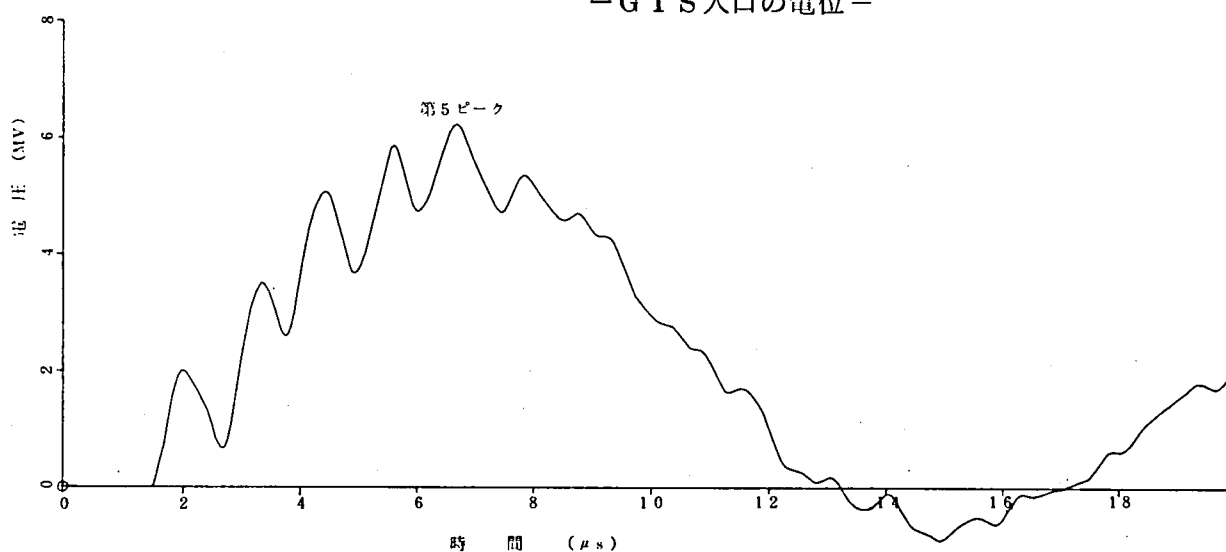
ースの系内最高値  $6.30\text{ MV}$  に達している。

変圧器端 ( $P_{18}$ ) では、変圧器の対地静電容量  $5000\text{ PF}$  により、同図(d)に示すように、ひずみを生じた波形となるが、第1ピークがGIS入口 ( $N_{68}$ ) の第1ピークより相当高い値になることから、この程度の静電容量では波形のひずみを除いては開放端として作用することを示している。その後、母線区分断路器 ( $P_{15}$ ) での正反射、GIS入口 ( $N_{68}$ ) での正反射が合成され、第2ピークを生じ、さらにこれらの反射により生じた第3ピークで最大値  $6.16\text{ MV}$  に達している。



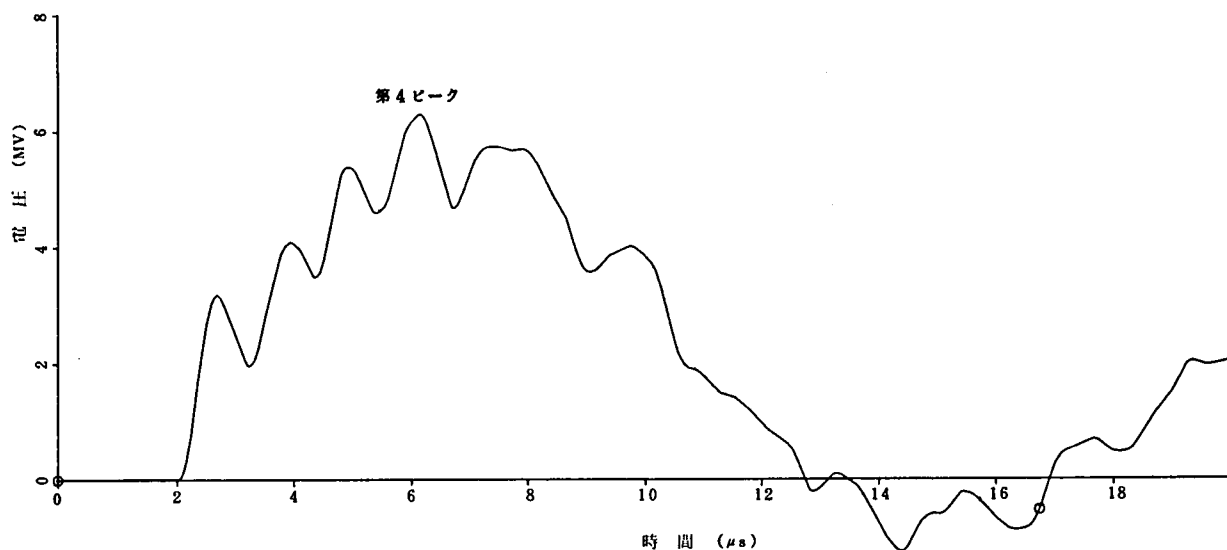
第 5.8 図(a) ケース  $I_1$  (避雷器なし)

—GIS入口の電位—

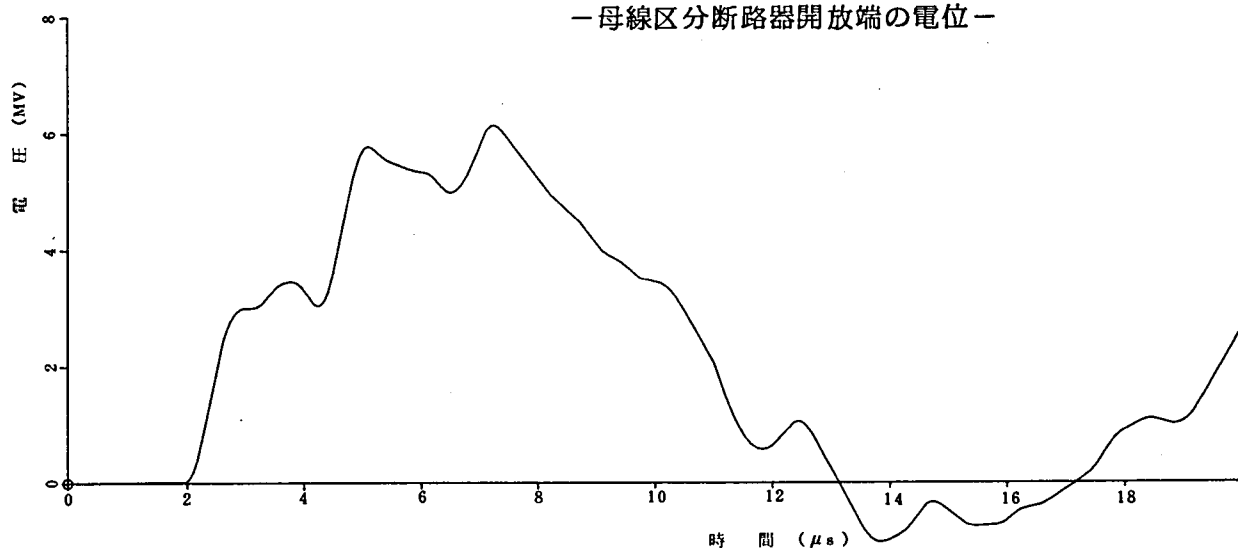


第 5.8 図(b) ケース  $I_1$  (避雷器なし)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



第 5.8 図(c) ケース I<sub>1</sub> (避雷器なし)  
—母線区分断路器開放端の電位—



第 5.8 図(d) ケース I<sub>1</sub> (避雷器なし)  
—変圧器端の電位—

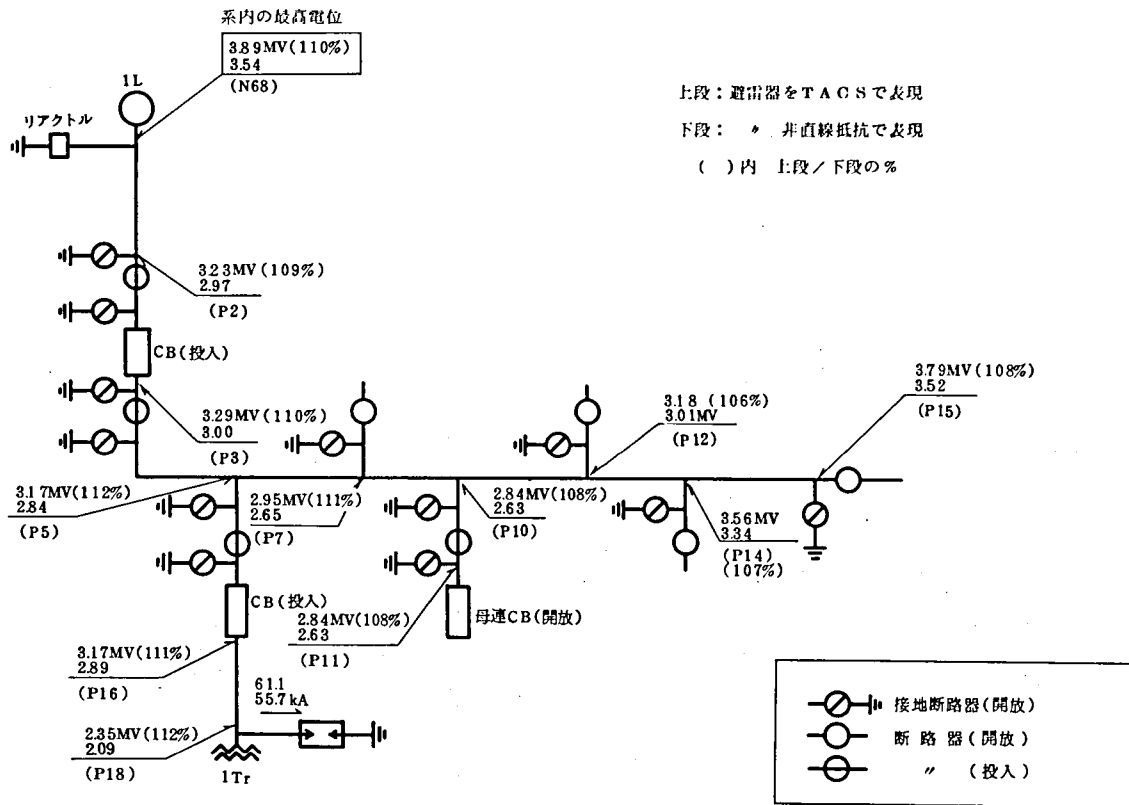
## (II) 変圧器端に避雷器を設置した場合(ケース II<sub>1</sub>)

このケースは、前節(I)の解析結果に基づき、また、変圧器は最重要被保護機器であり、その端子には避雷器を設けることが通例であるので、第2番目のケースとして解析したものである。

系内各節点の電圧ピーク値は、第5.9図に示すように、GIS入口(N<sub>68</sub>)と母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)の両端において高く、GISの中央部では低い形となっている。

なお、第5.9図の各節点において上段はZnO 避雷器の時間効果を考慮し、2.3にお

いて述べた方法により、TACSを用いて計算した結果、下段は時間効果を考慮せず、非直線抵抗として解析した結果である。両者の比は（ ）内に示したように、10%前後である。この表によると、系内の最高ピーク値はGIS入口（N<sub>68</sub>）において、3.89～3.54MVとケースⅠ<sub>1</sub>の最高ピーク値の62～56%に低減され、避雷器の効果をよく表わしている。

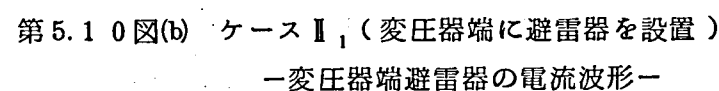
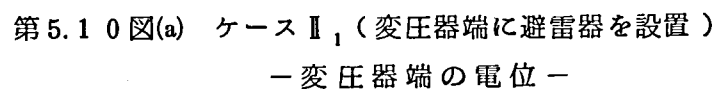


第5.9図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケースⅠ<sub>1</sub>

GIS入口（N<sub>68</sub>）の電位波形では、TACSを使用した場合と使用しない場合では波高値に若干の差が生ずるほかは、波形全体に差はなく、その第1ピークは避雷器の効果が未だあらわれないのでケースⅠ<sub>1</sub>のそれと等しいが、第2ピークについては、変圧器端（P<sub>18</sub>）からの反射がないため、ケースⅠ<sub>1</sub>の約83～76%に低減されている。しかし、母線区分断路器開放端（P<sub>15</sub>）からの反射により、このケースの系内の最高電位に達している。〔付録4 付4-1図(a)〕

線路側しゃ断器端（P<sub>2</sub>）においても、母線区分断路器開放端（P<sub>15</sub>）からの反射による影響が大きく、また、母線区分断路器開放端（P<sub>15</sub>）では、GIS入口（N<sub>68</sub>）からの反射波によってピークを生じる。〔付録4 付4-1図(b)(c)〕

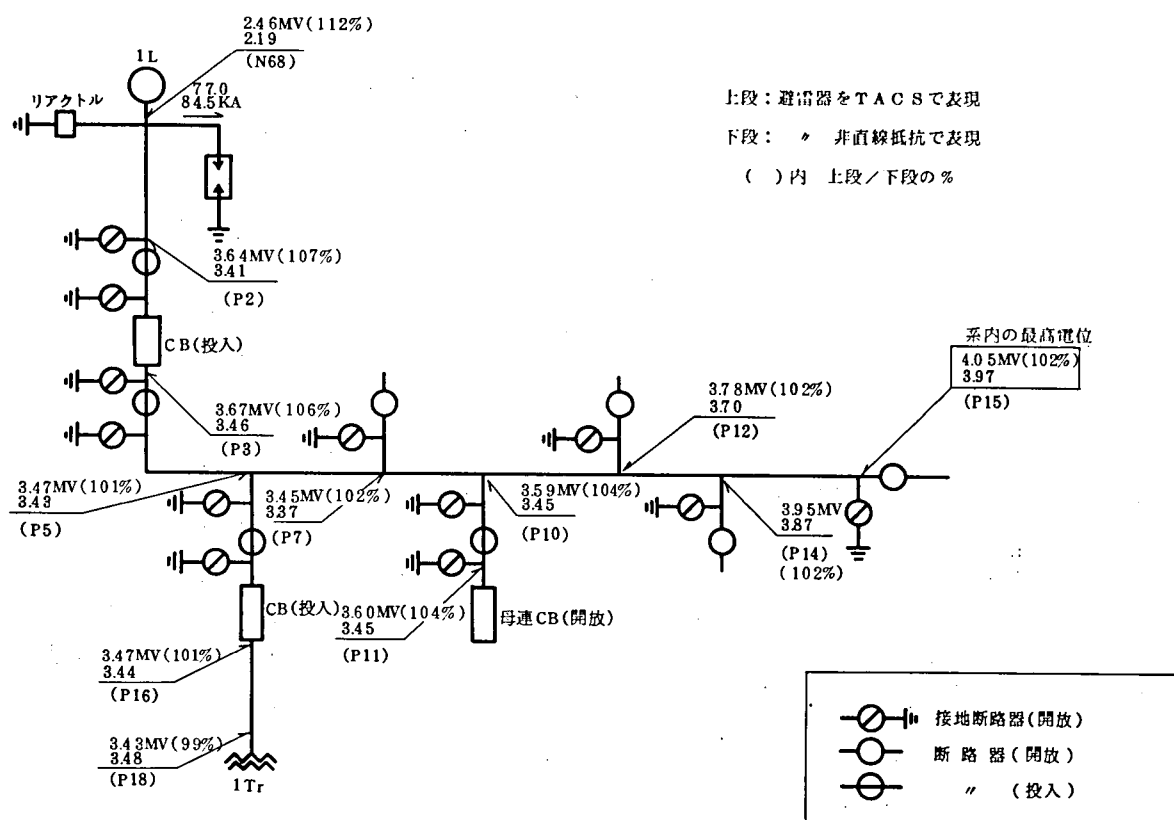
1



### (iii) GIS入口に避雷器を設置した場合(ケースⅢ<sub>1</sub>)

このケースは、GISでは送電線引込口付近の機器保護も含めGIS入口に避雷器(63)を設けることが最近の傾向になっていることもあり、また、前節のケースⅡ<sub>1</sub>との比較のためにも解析したものである。

第5.11図は、この場合の各節点の電圧ピーク値の一覧図である。各節点の上段、下段、( )内の数値は前節と同じく、それぞれ、TACSによる計算結果、非直線抵抗とした場合の計算結果、およびその比である。



第5.11図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケースⅢ<sub>1</sub>

系内の電位分布は、まずGIS入口では、避雷器により2.46～2.19MVに抑制されるが、末端の母線区分断路器開放端(P15)において系内の最高値4.05～3.97MVに達し、各節点はこの反射の影響により、ケースⅡ<sub>1</sub>の場合より高い値となっている。この結果は、避雷器の設置位置はGIS入口(N68)よりも、まず、変圧器端(P18)の方が効果的であるとのケースⅠ<sub>1</sub>での考察と一致している。系内各節点の波形は、前節の場合と同様、その波高値を除いては、避雷器の時間効果考慮の有無の影響はなく、この場合も避雷器の最大放電電流は77kA以上と許容値の2倍近くに達し問題である。



〔付録4 付4-2図(a)~(e)〕

次に、同図中の各節点の( )内に記入したZnO避雷器の時間効果を考慮した場合と考慮しない場合の電圧波高値の比を調べると、最大値を示すGIS入口においては112%であるが、母線に沿って進むに従って、次第に減少し、1Trへの分岐母線接続部(P<sub>5</sub>)以降では数%の差となり、系内の最高電位を生ずる母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)では102%と無視できる程度の僅かの差となる。すなわち、少なくとも1個の避雷器がGIS入口に設置される場合には、ZnO避雷器の時間効果を考慮しないで耐雷設計を行っても実用上は何等差し支えないことになる。実際問題として、TAOSを含んだ計算はかなり面倒な上、現在ではプログラム上、その挿入個所は1個所に限られる点をも勘案し、以降の解析は、すべてZnO避雷器の時間効果を考慮しないで行うこととした。

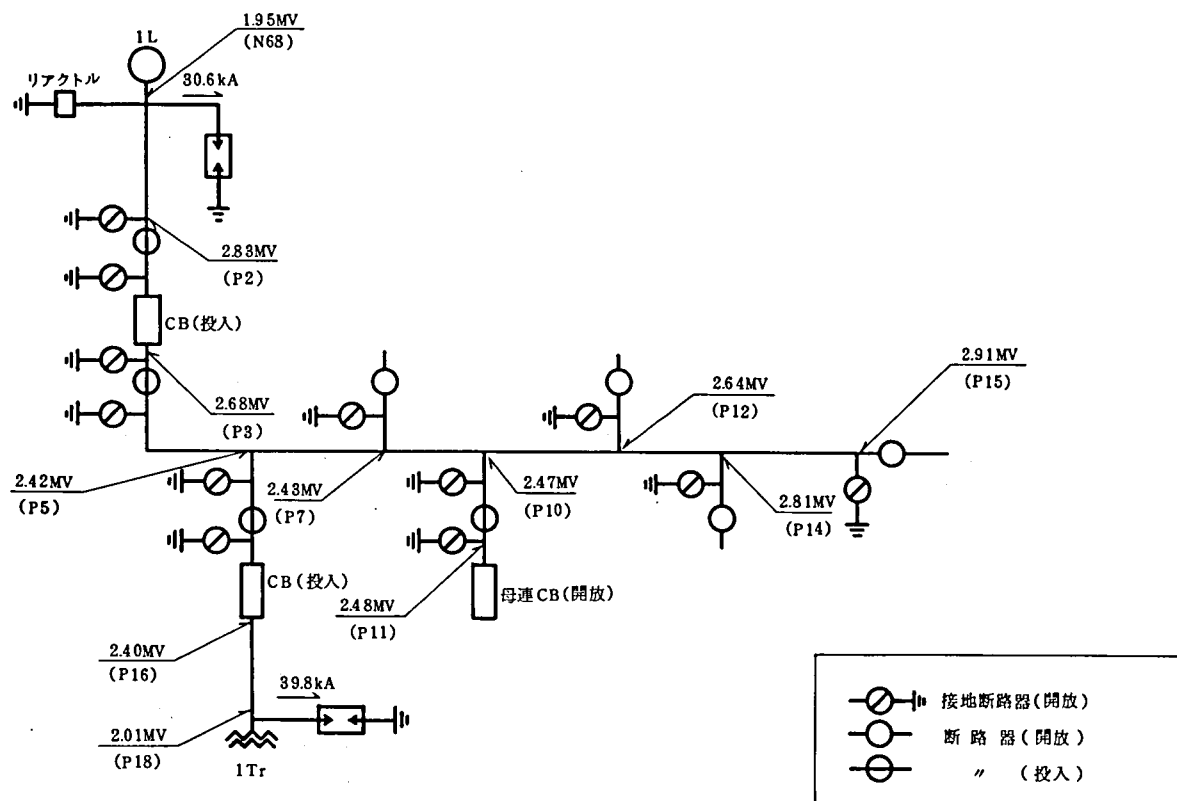
(IV) GIS入口、変圧器端の2個所に避雷器を設置した場合(ケースⅣ<sub>1</sub>)

変圧器端以外の他の1個の避雷器設置位置としては、GIS入口(N<sub>68</sub>)かあるいは母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)のいずれかが考えられるが、ケースⅡ<sub>1</sub>の解析結果では変圧器端(P<sub>18</sub>)に避雷器が設置されているにもかかわらず、GIS入口(N<sub>68</sub>)の方が母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)より高目の値となり、この場合の系内の最高電位になっていることおよびケースⅢ<sub>1</sub>で述べた最近の傾向を考慮して、他の避雷器をGIS入口に設置した場合を解析した。

各節点の電圧ピーク値は、第5.12図に示すとおりで、GIS入口(N<sub>68</sub>)と変圧器端(P<sub>18</sub>)では、避雷器によりそれぞれ1.95MV、2.01MVに抑えられている。変圧器端(P<sub>18</sub>)の方がGIS入口(N<sub>68</sub>)より若干高いのは、変圧器端(P<sub>18</sub>)の方が開放端として作用する要素が大きいためである。

系内の最高電位は、母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)からの反射によってきまることになる。この反射波は、さらに系内を往復反射して第2、第3のピークを生じるが、その様相は系の構成と関連するので、最高ピークは必ずしも第1反射点である母線区分断路器開放端(P<sub>15</sub>)で生じるとは限らないが、今回のケースでは、この点で系内の最高電位2.91MVを生じ、その影響を各節点に与えている。〔付録4 付4-3図(a)~(d)〕

また、避雷器に流れる電流ピーク値は、30.6kA、39.8kAと許容値40kA以下となっている。〔付録4 付4-3図(e)(f)〕



第 5.1 2 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケースⅣ<sub>1</sub>

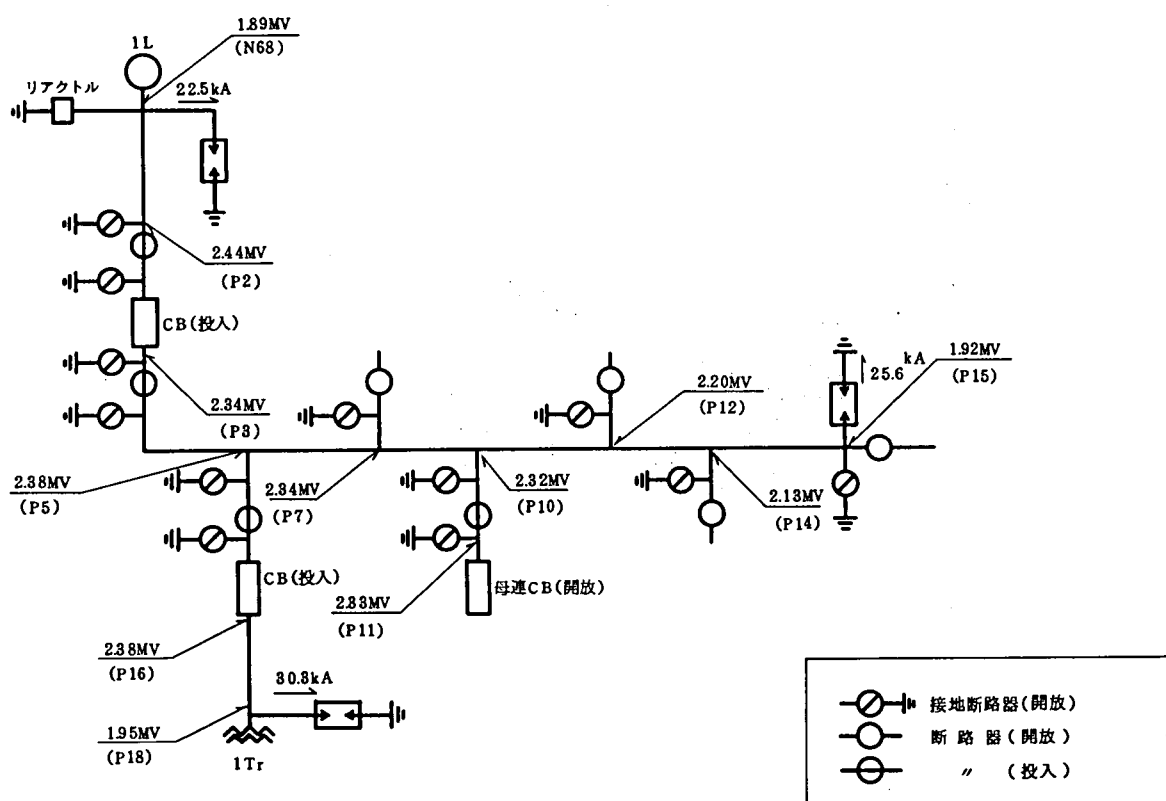
(V) GIS 入口、変圧器端、主母線の 3 個所に避雷器を設置した場合 (ケースⅤ<sub>1</sub>-P<sub>15</sub>)

このケースでは、主母線に設置する避雷器の位置が問題であるが、ケースⅣ<sub>1</sub>の解析結果から残りの開放端である母線区分断路器開放端 (P<sub>15</sub>) に設置した場合から解析することにした。なお、ケース番号は、ケースⅤ<sub>1</sub>-P<sub>15</sub>のように、母線避雷器の設置位置をも併記することにした。

第 5.1 3 図の系内各節点の電圧ピーク値一覧図に示すように、避雷器設置点では、いずれも 2 MV 以下となるが、線路側しゃ断器端子 (P<sub>2</sub>) において、この場合の系内最高電位 2.44 MV を生じている。しかし、波形は、前回のⅣ<sub>1</sub>までの波形に比べ、ピークの少ない比較的平坦なものとなっている。〔付録 4 付 4-4 図(a)~(d)〕

また、各避雷器には、22.5 kA、30.3 kA、25.6 kA といずれも許容値 40 kA にかなり余裕のある電流が分流して流れ、ZnO 避雷器のギャップレスである特長をよく表わしている。〔付録 4 付 4-4 図(e)(f)(g)〕

このように、ZnO 避雷器では、複数個の避雷器が相互に相協調して系内全体のサージ電圧抑制に貢献するという並列分坦効果が期待できる点が最大の特色である。従来形

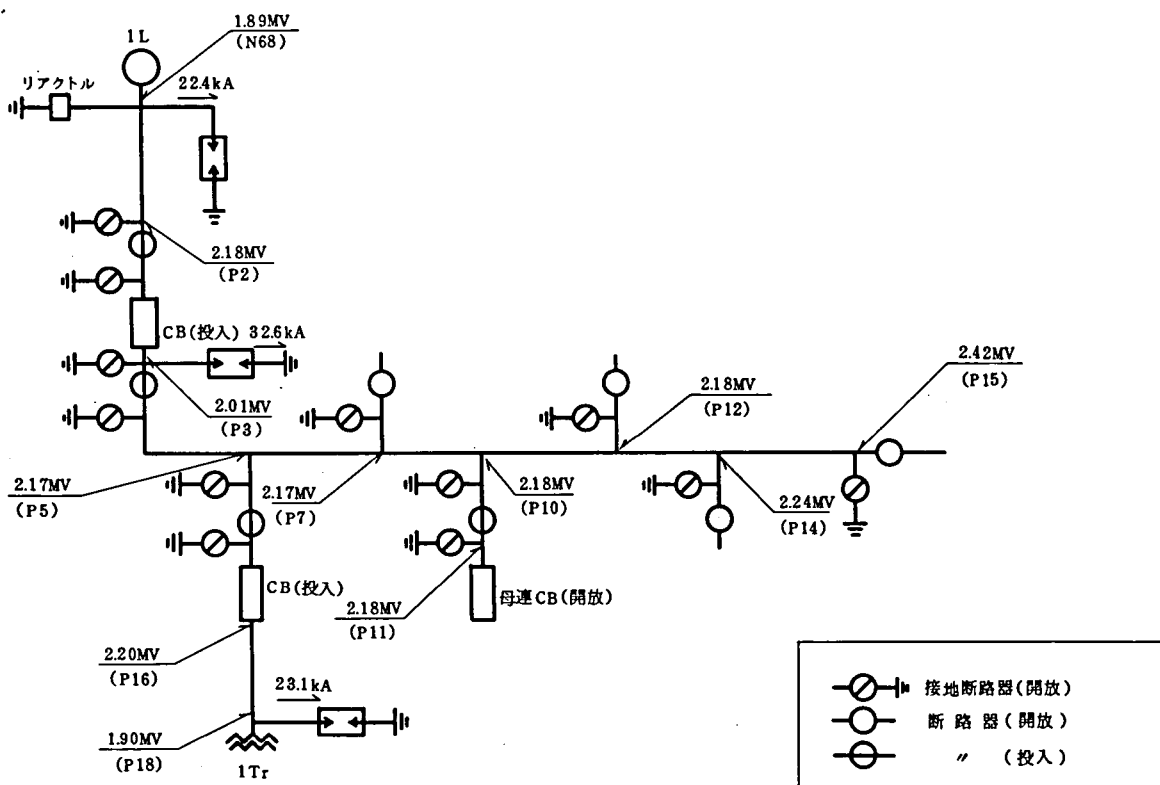


第 5.1 3 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値

ケース  $V_1-P_{15}$

避雷器の場合には、直列ギャップの放電特性に左右され、このような分担効果は期待できなかったので局所的な効果を主体とした耐雷設計にならざるを得なかったが、ZnO 避雷器を適用した耐雷設計では、なるべく少ない避雷器個数により系全体のサージ低減に最も効果的な避雷器の分散配置位置を求める等この並列分担効果を最大限に発揮できる避雷器適用法の追究が重要な課題となる。

このような観点から、第 5.1 3 図をみると、母線用避雷器の設置位置は  $P_{15}$  よりも最適の位置があると考えられるので、この避雷器を母線上の  $P_{12}, P_{10}, P_7, P_3$  の節点に順次移設した場合について解析した。結局、母線用避雷器は、線路用しゃ断器母線側 ( $P_3$ ) に設置したケース  $V_1-P_3$  の場合が最も効果的で、第 5.1 4 図に示す電位分布となり、系内の最高電位は、母線区分断路器開放端 ( $P_{15}$ ) において  $2.42 \text{ MV}$  となった。〔ケース  $V_1-P_{12}, V_1-P_{10}, V_1-P_7$  の各節点の電圧ピーク値一覧表、付録 4 付 4-5、6、7 図〕



第 5.1 4 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値

ケース  $V_1-P_3$

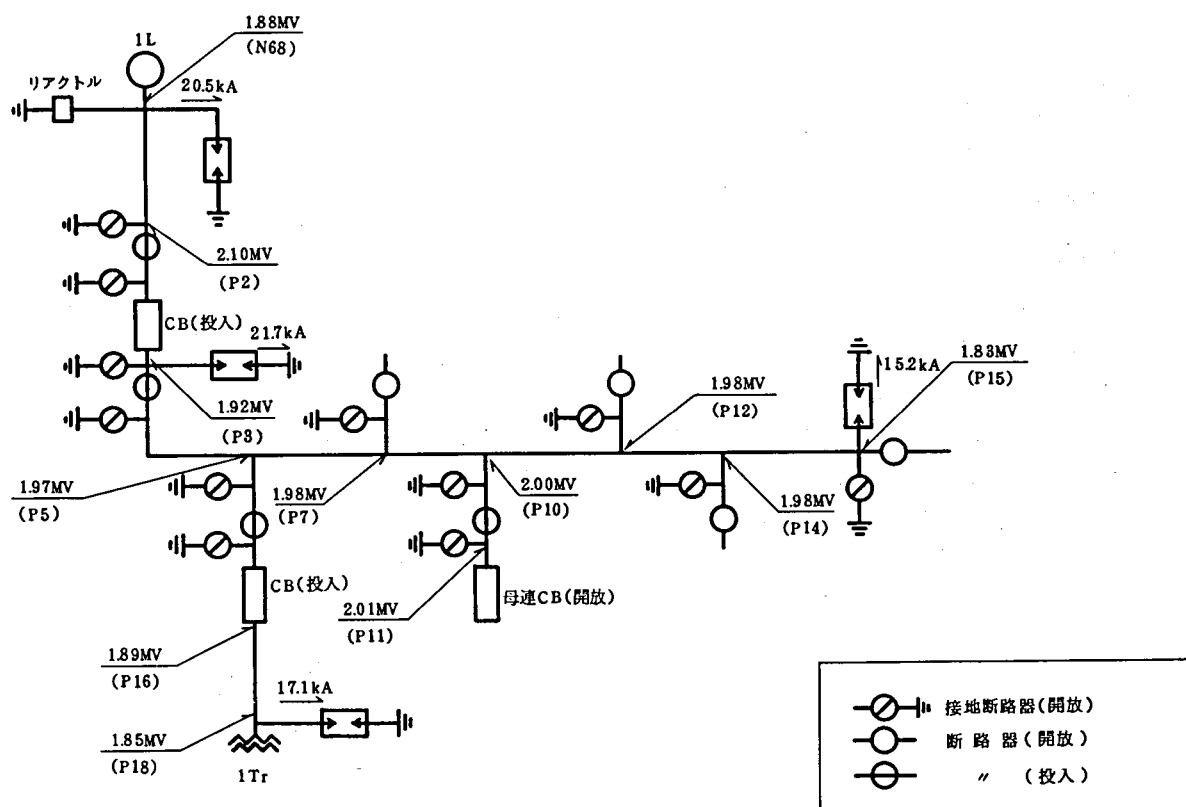
この値は、ケース  $V_1-P_{15}$  の系内最高電位  $2.44\text{MV}$  よりわずかに低い値にすぎないが、各節点のピーク値の平均は  $2.14\text{MV}$  とケース  $V_1-P_{15}$  の  $2.22\text{MV}$  より低く、代表的節点の波形も平坦になっている。〔付録 4 付 4-8 図(a)~(d)〕

また、各避雷器に流れる電流ピーク値も、 $22.4\text{kA}$ 、 $23.1\text{kA}$ 、 $32.6\text{kA}$  と許容値  $40\text{kA}$  より相当低い値となっている。〔付録 4 付 4-8 図(e)(f)(g)〕

(vi) GIS 入口、変圧器端、母線 2 ヶ所 ( $P_3$  と  $P_{15}$ ) に避雷器を設置した場合 (ケース  $V_1-P_3-P_{15}$ )

ケース  $V_1-P_3$  の解析結果から、さらに母線区分断路器開放端 ( $P_{15}$ ) にも避雷器を設けた場合について解析したもので、系内各節点の電圧ピーク値は第 5.1 5 図に示すとおりである。各節点とも  $1.95 \pm 0.15\text{MV}$  と 8% の変動範囲内にあり、系内の電位分布は極めて平坦なものとなる。系内の最高電位は線路用しゃ断器端 ( $P_2$ ) における  $2.10\text{MV}$  である。各節点における電位波形もさらに平坦になり、各避雷器に流れるサージ電流ピーク値も  $22\text{kA}$  以下と許容値  $40\text{kA}$  に対し相当余裕のある値となる。

〔付録4 付4-9図(a)~(h)〕



第5.15図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値

ケース  $V_1-P_3-P_{15}$

さらに、避雷器個数をこれ以上増加することについては、既に系全体が以上のように電圧ピークの少ない平坦な状態であることから、その効果は少なく、経済性の観点からは得策でないおそれもあり、今回のケース  $V_1-P_3-P_{15}$  の4個の避雷器適用が限度と考えられる。

(vii) 解析結果のまとめ

以上、各ケースにおける解析結果の概要をのべた。これらを一覧表に示せば第5.3表となるが、避雷器の許容電流ピーク値40kAを考慮すれば、実現可能なケースは、ケース  $IV_1$  以降となる。

5.5.2 2Trが接続された回路の解析結果

この場合も5.5.1の場合と同様、避雷器なしの場合(ケース  $I_2$ )からGIS入口( $N_{68}$ )、変圧器端( $P_{18}$ )、主母線の3個所に避雷器を設置した場合(ケース  $V_2-P_3$ )まで9ケースの解析を行った。

第5.3表 各計算ケースにおける電位分布一覧表

(1Trが接続されている場合、避雷器特性P)

ケース	避雷器位置 節 点	電 圧 ピ ーク 値 ( M V )												避雷器に流れる電 流ピーク値 ( KA )		
		N68	P 2	P 3	P 5	P 7	P10	P11	P12	P14	P15	P16	P18	GIS 入口	変圧器	母 線
I <sub>1</sub>	— — —	5.81	6.25	6.22	5.86	5.69	5.75	5.75	6.00	6.17	<u>6.30</u>	5.76	6.16	—	—	—
II <sub>1</sub>	— P <sub>18</sub> —	<u>3.89</u>	3.23	3.29	3.17	2.95	2.84	2.84	3.18	3.56	3.79	3.17	2.35	—	61.1	—
III <sub>1</sub>	N <sub>68</sub> — —	2.46	3.64	3.67	3.47	3.45	3.59	3.60	3.78	3.95	<u>4.05</u>	3.47	3.43	77.0	—	—
IV <sub>1</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> —	1.95	2.83	2.68	2.42	2.43	2.47	2.48	2.64	2.81	<u>2.91</u>	2.40	2.01	30.6	39.8	—
V <sub>1</sub> —P <sub>15</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>15</sub>	1.89	<u>2.44</u>	2.34	2.38	2.34	2.32	2.33	2.20	2.13	1.92	2.38	1.95	22.5	30.3	25.6
V <sub>1</sub> —P <sub>12</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>12</sub>	1.92	<u>2.57</u>	2.43	2.17	2.10	2.06	2.06	1.99	2.15	2.36	2.16	1.92	25.7	26.6	30.7
V <sub>1</sub> —P <sub>10</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>10</sub>	1.92	<u>2.55</u>	2.40	2.17	2.00	1.94	1.94	2.14	2.31	2.44	2.18	1.91	25.7	24.3	24.1
V <sub>1</sub> —P <sub>7</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>7</sub>	1.90	<u>2.49</u>	2.35	2.14	1.94	2.03	2.04	2.14	2.24	2.42	2.19	1.89	23.3	22.2	24.1
V <sub>1</sub> —P <sub>3</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>3</sub>	1.89	2.18	2.01	2.17	2.17	2.18	2.18	2.18	2.24	<u>2.42</u>	2.20	1.90	22.4	23.1	32.6
V <sub>1</sub> —P <sub>3</sub> —P <sub>15</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>3</sub> P <sub>15</sub>	1.88	<u>2.10</u>	1.92	1.97	1.98	2.00	2.01	1.98	1.98	1.83	1.89	1.85	20.5	17.1	(P3) 21.7 (P15) 15.2

注；下線 — は系内の最高電圧ピークを示す。

解析結果は、変圧器位置 ( P<sub>18</sub> ) がGIS入口 ( N<sub>68</sub> ) から5.5.1の場合より76m遠方になっているため、こゝからの反射波の影響の様相が異なる以外は本質的な相異は認められなかった。〔付録4 付4-10図～付4-15図〕

各ケースにおける系内各節点の電圧ピーク値一覧図〔付録4 付4-16図～付4-24図〕から解析結果の一覧表を作成すると第5.4表となり、系内の最高電位が最も低減されるのはケースV<sub>2</sub>—P<sub>12</sub>の2.12MVで、この値はさきのV<sub>1</sub>—P<sub>3</sub>の2.42MVより相当低く、むしろケースV<sub>1</sub>—P<sub>3</sub>—P<sub>15</sub>の2.10MVに近い値になっている。

また、この表における系内最高電位を第5.3表のそれと比較すると、避雷器なしのケースを除き、その他はすべてこの第5.4表の方が低い値となっている。従って、避雷器による保護を考慮した場合の耐雷設計の検討は1Trが接続された回路について行えば十分となる。

### 5.5.3 避雷器のV—I特性がF特性に向上した場合

5.5.1および5.5.2は、避雷器のV—I特性が現在技術に基づいたP特性の場合について

第 5.4 表 各計算ケースにおける電位分布一覧表  
( 2 Tr が接続されている場合、避雷器特性 P )

避雷器位置 ケース節 点			電 圧 ピ ーク 値      ( M V )											避雷器に流れる電 流ピーク値 ( KA )			
			N68	P 2	P 3	P 5	P 7	P10	P11	P12	P14	P15	P16	P18	GIS 入口	変圧器	母 線
I <sub>2</sub>	— — —		6.29	6.25	6.18	5.99	6.12	6.29	6.29	6.42	6.48	6.70	6.34	<u>7.01</u>	—	—	—
Ⅱ <sub>2</sub>	— P <sub>18</sub> —		2.82	2.73	2.74	2.59	2.52	2.46	2.47	2.51	2.69	<u>2.85</u>	2.78	2.09	—	55.7	—
Ⅲ <sub>2</sub>	N <sub>68</sub> — —		2.18	3.72	3.77	3.59	3.53	3.75	3.77	3.77	3.76	3.85	3.83	<u>3.92</u>	81.5	—	—
Ⅳ <sub>2</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> —		1.94	2.22	2.31	2.23	2.32	2.38	2.39	<u>2.42</u>	2.36	2.38	2.40	2.00	283	383	—
V <sub>2</sub> —P <sub>15</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>15</sub>		1.90	2.20	<u>2.26</u>	2.22	2.17	2.24	2.25	2.20	2.07	1.88	2.04	1.92	22.9	262	19.7
V <sub>2</sub> —P <sub>12</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>12</sub>		1.88	2.06	<u>2.12</u>	2.08	2.01	2.00	2.00	1.93	2.01	2.08	1.96	1.95	20.5	30.7	22.5
V <sub>2</sub> —P <sub>10</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>10</sub>		1.88	2.06	2.02	2.00	1.97	1.93	1.94	2.02	2.09	<u>2.19</u>	2.03	1.96	20.5	31.5	21.3
V <sub>2</sub> —P <sub>7</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>7</sub>		1.88	2.04	2.00	1.93	1.88	2.02	2.02	2.07	2.09	<u>2.20</u>	2.08	1.96	20.5	31.3	18.3
V <sub>2</sub> —P <sub>3</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>3</sub>		1.88	1.94	1.90	2.05	2.06	2.08	2.09	2.11	2.23	<u>2.36</u>	2.17	1.96	20.5	31.0	19.3

注；下線 — は系内の最高電圧ピークを示す。

で解析したが、将来その実現が期待されている F 特性に向上した場合についても解析した。  
この場合、前節に述べた結果から、1 Tr を接続した第 5.4 図(1)の回路のみを対象として解析した。

第 5.5 表は各ケースの解析結果〔付録 4 付 4-25 図～付 4-29 図〕の一覧表で、これを第 5.3 表と比較すると、各節点とも、ほぼ避雷器特性が向上した分だけ、電圧ピーク値が低減されている。

しかし、避雷器に流れる電流は当然増加し、ケース IV'<sub>1</sub> の場合にも変圧器端避雷器に流れる電流は 42.3 kA と許容値の 40 kA を超過し、ケース II'<sub>1</sub>、ケース III'<sub>1</sub> のみならずケース IV'<sub>1</sub> も実際には実現不可能となる。

従って、この場合には結局、避雷器は 3 個以上が必要となるが、ケース V'<sub>1</sub>—P<sub>3</sub> の解析結果では、各節点のピーク電圧値は、5.5.1 のケース V<sub>1</sub>—P<sub>3</sub>—P<sub>15</sub> で検討した P 特性の避雷器を 4 個設置した場合の各節点のピーク値とほぼ等しく、系内の最高電位もケース V<sub>1</sub>—P<sub>3</sub>—P<sub>15</sub> より僅かに 0.02 MV 高目の 2.13 MV に収まっている。このことは、ZnO 避雷器では、P 特性から F 特性に特性を向上することにより 4 個必要とした避雷器

を3個に節減し得ることを示している反面、いたずらに特性の向上のみを追究し過酷な適用を強いるよりも、設置個数が若干増加しても安定した性能の避雷器を巧みに分散配置し並列分担効果の特徴をいかす方が得策となり得る場合もあることを示唆している。

第5.5表 各計算ケースにおける電位分布一覧表

(1Trが接続されている場合、避雷器特性F)

ケース	避雷器位置	節 点	電 圧 ピ ーク 値 ( M V )												避雷器に流れる電流ピーク値 ( KA )		
			N 68	P 2	P 3	P 5	P 7	P 10	P 11	P 12	P 14	P 15	P 16	P 18	GIS入口	変圧器	母 線
I <sub>1</sub>	— — —		5.81	6.25	6.22	5.86	5.69	5.75	5.75	6.00	6.17	<u>6.30</u>	5.76	6.16	—	—	—
II <sub>1</sub>	— P <sub>18</sub> —		<u>3.27</u>	2.66	2.62	2.45	2.28	2.49	2.50	2.73	2.96	3.19	2.49	1.80	—	58.0	—
III <sub>1</sub>	N <sub>68</sub> — —		1.94	3.07	3.12	3.18	3.14	3.25	3.26	3.45	3.59	<u>3.65</u>	3.22	3.26	90.0	—	—
IV <sub>1</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> —		1.71	2.52	2.43	2.20	2.24	2.23	2.23	2.41	2.52	<u>2.62</u>	2.17	1.73	36.1	42.3	—
V <sub>1</sub> — P <sub>3</sub>	N <sub>68</sub> P <sub>18</sub> P <sub>3</sub>		1.66	1.94	1.76	1.95	1.99	2.00	2.00	1.98	1.99	<u>2.13</u>	1.99	1.64	26.8	23.4	32.6

注1. 下線——は系内の最高電圧ピークを示す。

注2. I<sub>1</sub>' は I<sub>1</sub> と同一となる。

注3. V<sub>1</sub> — P<sub>3</sub> は第5.3表の解析結果から選定した。

## 5.6 1200kV GIS変電所の耐雷設計とLIWL

前節までの解析結果から、1200kV UHV GIS変電所のUHV GISに対する耐雷設計とLIWLについてまとめると次のとおりとなる。

- (1) ZnO 避雷器の個数は、放電電流耐量から2個以上が必要である。
- (2) 避雷器2個の場合は、GIS入口および変圧器端に設置することが適当で、この場合、GISのLIWLは、2950kVと相当高い値となり、また、変圧器端の避雷器には、39.8kAと許容値近くのサージ電流が流れる。次に、避雷器のV—I特性が将来実現が期待されている特性に向上した場合には、LIWLは2650kVに低減されるが、変圧器端の避雷器に流れる最大サージ電流は42.3kAと許容値の40kAを超過し、現実的ではなくなる。
- (3) 以上から結局、避雷器は3個以上設けることが必要となる。ZnO 避雷器では並列分担効果を最大限に活用できるように避雷器の分散配置をはかることが肝要であるが、避雷器



3 個の場合には、GIS 入口、変圧器端、線路用しゃ断器端の位置が適切であり、この場合のLIWLは2450 kV となる。また、避雷器に流れるサージ電流も30 kA 以下となりこの面でも余裕ができる。さらに、避雷器の特性が向上した場合にはLIWLは2150 kV となり、避雷器に流れるサージ電流は若干増大するが、最大32.6 kA で問題になることはない。

- (4) 避雷器をさらに母線区分断路器にも設置し、合計4 個とした場合には、GIS 内のサージ分布は極めて平坦化されたものとなり、LIWLは2100 kV に低減される。また、避雷器に流れるサージ電流は22 kA 以下と極めて余裕のある値となる。
- (5) 避雷器個数をさらに増加させることについては、ZnO 避雷器特有の並列分担効果によりそれ相応の効果は期待できようが、吸収すべきピークが既に少なくなっていることからLIWLの大きな低減効果は望めず、電流面からも余裕がありすぎることになり、結局、避雷器過剰の感を免れず、かえって経済性を損うことも懸念される。
- (6) すなわち、1200 kV UHV GIS 変電所では、各主母線区分ごとにZnO 避雷器を現状では4 個、将来そのV-I 特性が向上した場合には3 個をGIS 入口、変圧器端、線路側しゃ断器端、母線区分断路器端(4 個の場合)に設置することが最適の耐雷設計となり、LIWLとしては2200 kV 程度と現行の500 kV GIS の1800 kV に比べて大幅に低減された水準とし、経済設計をはかることができる。

## 結 言

現在、世界的に開発が進められている次期のUHV送電において積極的な採用が予想されるGIS変電所では、ZnO避雷器の適切な適用によるGISのLIWL低減への努力が経済設計の基礎となるものであり、これには精度の高い耐雷設計解析が不可欠な課題となる。

この論文は、このような背景に立脚して、GISに対する耐雷設計に関する研究を行った成果であって、新しい分野であるGIS、ZnO避雷器のみならず、鉄塔、がい子装置のホーンギャップ等の問題についてもあらためて検討を加え、理論的にも妥当で、実測結果ともよく一致する一般性のある実用的な耐雷設計法をまとめたものである。各章の内容をあらためて整理すると次のとおりである。

第1章では、変電所耐雷設計の基礎となる変電所への最も過酷な侵入サージは、第1鉄塔への直撃雷により発生する鉄塔逆閃絡に起因するものであることから、鉄塔の雷サージ特性について検討したものである。従来の耐雷設計においては、通常、鉄塔の雷サージ特性は、実用鉄塔における実測とその解析の結果に基づいて、塔頂からのサージインピーダンスが約100Ω、伝搬速度が光速の70～80%の単一の分布定数回路として表現されている。しかし、これらの値は、これまでの理論解析から得られる結果とは大巾に異なっているので、理論的根拠が明確であるとは言い難く、従ってUHV用の巨大な高鉄塔に、従来の鉄塔で得られた数値をそのまま適用することには疑問がある。このような状況から、この論文では、まず鉄塔の雷サージ特性に関する測定法と測定結果および理論解析の両面について、過去の経緯を整理し、これらに対する考察を加え、変電所の耐雷設計を対象とする場合、実用上十分であろうと考えられる鉄塔モデルを考案し、これにより鉄塔の雷サージ特性を論ずることにした。測定および理論に対する比較研究を行った結果、各種測定法およびその測定結果と理論との対応関係を明確にすることができたが、同時に従来の理論解析は、すべてが腕金および電線の存在を無視し、支柱部のみを対象とした単一の垂直導体として取り扱っているため、実測結果と数値的に大きな相違を生ずること、逆に、実測結果と一致させるためには、その等価半径は実鉄塔との等価性が全く失われるほど巨大なものになることが判明した。

このことから、鉄塔を腕金の存在する上部と支柱部の下部にわけて、上部の等価半径を下部より大きくした2段積みの円柱導体とし、これら上部、下部のサージインピーダンスを鉄塔寸法より求め、鉄塔におけるサージの伝搬速度を光速に等しいとして、この論文に必要なUHV鉄塔の雷サージ特性を表現する根拠にした。

第2章は、がい子装置に設けられているホーンギャップの閃絡特性およびZnO 避雷器のデジタル計算回路への組み込みについて述べたもので、前者については、OR素子で構成される2組の直列回路を逆向きに並列し、一定の閉路電圧をもつ3個のスイッチの直列回路と組み合わせた回路を考案し、これによりこの回路が、ホーンギャップのV-t特性と全く同様の特性を示すことを明らかにし、従来、適当な方法がないとして不可能視されていたホーンギャップの閃絡特性をデジタル計算回路に精度よく組み込みできることをはじめて示した。

次いで、変電所耐雷設計の主役となるZnO 避雷器のV-I特性とサージ電流の波頭峻度の関係について考察を加え、ZnO 避雷器では、直列ギャップがないので、そのサージ保護特性はZnO 素子のV-I特性のみによって決定されることになるが、ZnO 素子のような非直線抵抗素子のV-I特性は一般に、雷サージ電流の波頭峻度によって大巾に変化する特性（これを時間効果とよぶことにした）がある。ZnO 避雷器で保護された耐雷設計の検討にあたっては、当然この問題を解決しておく必要があるにもかかわらず、デジタル計算による解析的取り扱いが困難であったため従来は放置されていたが、ZnO 素子固有の定数により表わされた電圧-電流の特性式と制御回路用のフィードバック計算用プログラムTACSを電気回路のプログラムEMTPに組み合わせて用いることにより、実用性のある解析的取り扱いが可能になることを示し、また、サージ電流の波頭峻度が厳しい場合には、今回示した解析法による必要があるが、あまり厳しくない場合には、非直線抵抗として取り扱っても実用上差し支えないことを述べ、耐雷設計上のZnO 避雷器の取り扱いを明確なものにした。

第3章は、GISの雷サージ特性を論じたもので、まず、世界ではじめて完成した500kVの実用GISについて詳細な実験的研究を行い、その結果に対する考察から、母線、しゃ断器、断路器等構成機器の複雑な集合体であるGISを単純な同心のケーブルとして取り扱う従来の方法が不的確なことを示し、新しい取り扱い方として（1）GIS内のサージの伝搬速度は光速に等しいとする。（2）GIS内のサージインピーダンスは母線に対する同心円筒の理論式から得られる値とする。（3）各構成機器には、スパーサ、その他各機器固有の静電容量、インダクタンス等を正しく評価し、忠実に付加した回路とする。ことにより理論的にも妥当で実測結果ともよく合致する一般性のある解析法が得られることを述べた。

以上、第1章～第3章においては、耐雷設計解析上の主要要素である鉄塔、がい子装置のホーンギャップ、ZnO 避雷器、GISに対する筆者の新しい解析法を述べ、これらの取り扱いを明確なものとした。

第4章では、第1章～第3章に示した鉄塔、がい子装置のホーンギャップ、ZnO 避雷器、

G I S に対する解析法を 1 2 0 0 k V U H V 系統に適用し、さらに、鉄塔の塔脚接地抵抗、鉄塔腕金、電線などサージの伝搬過程に関連する諸因子を付加した解析回路を構成し、第 1 鉄塔への直撃雷による逆閃絡サージが G I S 変電所へ侵入する様相を具体的に解析した。その結果 U H V 鉄塔では、地上の電界強度低減のために設けられたしゃへい線が耐雷設計上も大きな効果をもっていること、ホーンギャップの閃絡は雷サージの鉄塔往復時間内に雷撃電流の波頭部で生ずるので、鉄塔の塔脚接地抵抗値の影響はほとんどうけないこと等 5 0 0 k V 以下の鉄塔の場合と大きく異った様相となることをはじめ、G I S への侵入サージに対しては、鉄塔腕金、ホーンギャップ等閃絡発生時の電流通路の直列インダクタンスがピーク値の低減のみならず、波形の峻度緩和に大きな影響をもっているので、Z n O 避雷器を適用したサージ解析を行う場合には、これらのインダクタンスの値を適正に評価し考慮することが重要であるとともに、これにより Z n O 避雷器の時間効果の影響は必ずしも考慮する必要のないことを示した。

第 5 章は、第 4 章で述べた逆閃絡サージが 1 2 0 0 k V G I S に侵入した場合の G I S 内のサージ分布を解析したもので、Z n O 避雷器の適用方法を詳細に検討し、Z n O 避雷器では複数の避雷器を適切に分散配置し、ギャップレスの特徴をいかした並列分坦効果の活用をはかることが重要であることを明らかにするとともに、耐雷設計の最適結果として、2 2 0 0 k V の L I W L が実現可能であることを示した。

以上のとおり、この論文は Z n O 避雷器で保護された U H V G I S 変電所における U H V G I S の耐雷設計について述べたものであるが、研究の内容は、理論的にも妥当で、実測結果ともよく合致する実用的な解析法を新しく提案しているので、今後の U H V G I S 開発の基礎として役立つものと考えている。

## 主 要 記 号 表

$A$ : ベクトル・ポテンシャル	
$a$ : ZnO素子の定数	
$b$ : ZnO素子の定数	
$C$ : 静電容量	[ $\mu F$ ]
$C_0$ : ZnO素子試験時の電源容量	[ $\mu F$ ]
$C_b$ : G I S 分岐母線の静電容量	[ $\mu F$ ]
$C_{cb}$ : しゃ断器の付加静電容量	[ $\mu F$ ]
$c$ : ZnO素子の定数	
$C_0$ : 光速度 $3 \times 10^8$	[ m/S ]
$D_1$ : 同心ケーブルの内部導体の外径	[ m ]
$D_2$ : 同心ケーブルの外被の内径	[ m ]
$d_1$ : G I S しゃ断器内部電極の外径	[ m ]
$d_2$ : G I S しゃ断器外被の内径	[ m ]
$E$ : ベクトル電界強度	[ V/m ]
$E_0$ : ZnO避雷器の $I = 0$ のときの仮想電界強度	[ V/m ]
$E_i(t)$ : 印加サージ電圧	[ MV ]
$E(t)$ : 端子電圧	[ MV ]
$e_r$ : 測定電圧/印加電圧	
$F_r$ : 透過係数	
$H$ : 鉄塔の地上高	[ m ]
$H_1$ : 鉄塔下部の長さ	[ m ]
$H_2$ : 鉄塔上部の長さ	[ m ]
$I_0$ : 雷撃電流の波高値	[ KA ]
$I_L$ : ZnO避雷器に流れる電流最大値	[ KA ]
$i(t)$ : ZnO避雷器に流れる電流	[ KA ]
$i_0(t)$ : 雷撃電流	[ KA ]
$K$ : 印加電圧の波頭峻度	[ KV/ $\mu S$ ]
$K_0$ : ZnO素子の定数	

$L$ : インダクタンス	[ $\mu\text{H}$ ]
$L_a$ : 鉄塔腕金のインダクタンス	[ $\mu\text{H}$ ]
$L_z$ : ZnO素子の積み上げ高さ	[ $\text{cm}$ ]
$\ell$ : 長 さ	[ $\text{m}$ ]
$m$ : ZnO素子の定数	
$N_i$ : 送電線部における節点番号 ( $i = 1 \sim 68$ )	
$P_i$ : GISにおける節点番号 ( $i = 1 \sim 18$ )	
$P_{ij}$ : 倍 率 比	
$R$ : 抵 抗	[ $\Omega$ ]
$R_T$ : 塔脚接地抵抗	[ $\Omega$ ]
$r_c$ : 単導体の半径	[ $\text{m}$ ]
$r$ : 鉄塔の等価円柱の半径	[ $\text{m}$ ]
$r_{T1}$ : 鉄塔下部の等価円柱の半径	[ $\text{m}$ ]
$r_{T2}$ : 鉄塔上部の等価円柱の半径	[ $\text{m}$ ]
$S_z$ : ZnO素子の断面積	[ $\text{cm}^2$ ]
$t$ : 時 間	[ $\mu\text{s}$ ]
$V_A, V_B, V_C$ : 送電線の電位	[ $\text{MV}$ ]
$V_g$ : ギャップの直流閃絡電圧	[ $\text{MV}$ ]
$V_r(t)$ : 避雷器の制限電圧	[ $\text{MV}$ ]
$v_1(t), v_2(t)$ : ホーンギャップの模擬回路のスイッチにかかる電圧	[ $\text{MV}$ ]
$v(t)$ : ホーンギャップの模擬回路の端子電圧	[ $\text{MV}$ ]
$v_A, v_B, v_C$ : 水平アンテナの電位	[ $\text{V}$ ]
$v_T$ : 鉄塔の塔頂電位	[ $\text{MV}$ ]
$v_g$ : ギャップにかかるサージ電圧	[ $\text{MV}$ ]
$Z$ : サージインピーダンス	[ $\Omega$ ]
$Z_0$ : 測定線のサージインピーダンス	[ $\Omega$ ]
$Z_c$ : 同心ケーブルのサージインピーダンス理論値	[ $\Omega$ ]
$Z_e$ : GISの実測から得られるサージインピーダンス	[ $\Omega$ ]
$Z_G$ : 架空地線のサージインピーダンス	[ $\Omega$ ]
$Z_i$ : 水平単導体のサージインピーダンス	[ $\Omega$ ]

$Z_p$ : 相導体のサージインピーダンス		[ $\Omega$ ]
$Z_s$ : しゃへい線のサージインピーダンス		[ $\Omega$ ]
$Z_{Tu}$ : 鉄塔の上部サージインピーダンス		[ $\Omega$ ]
$Z_{Tl}$ :   "   下部               "		[ $\Omega$ ]
$Z_T$ :   "   のサージインピーダンス		[ $\Omega$ ]
$a$ : 避雷器の定数		
$\epsilon$ : 比誘電率		
$\epsilon_0$ : 真空の誘電率	$\frac{10^7}{4\pi C \sigma^2}$	[Farad/m]
$\mu$ : 比透磁率		
$\mu_0$ : 真空の透磁率	$\frac{4 \pi}{10^7}$	[Henry/m]
$\tau$ : 計算のきざみ時間		[ $\mu S$ ]
$\tau_1$ : 塔頂からしゃへい線までサージが往復する時間		[ $\mu S$ ]
$\tau_2$ : 塔頂から塔脚までサージが往復する時間		[ $\mu S$ ]
$\nu$ : 分 圧 比		
$\theta$ : 円錐体の頂角の $\frac{1}{2}$		[ Rad ]
$\kappa_{Tu}$ : 鉄塔上部における減衰係数		
$\kappa_{Tl}$ : 鉄塔下部における減衰係数		

## 参 考 文 献

- (1) 河村：SF<sub>6</sub> ガス絶縁開閉装置                      電気学会誌，昭52-5，P394
- (2) CIGRE, Final Report of the UHV Electra, No24, P33, Oct. 1972
- (3) 永井ほか：酸化亜鉛形避雷器                      電気学会誌，昭55-6，P515
- (4) K. Morii, S. Matsumura et al: Field Experience and Future Trends of 500 KV Gas Insulated Metal Clad Substations, CIGRE, 23-02 (1978)
- (5) 伊藤ほか：東芝レビュー 3巻，9号，P790，昭55
- (6) (4)と同じ
- (7) 中央電力協議会UHV開発推進委員会、送電電圧検討のための基礎資料—基礎特性各論—  
昭53-7，P228
- (8) G. N. Aleksandrov et al: Arresters for Substantial Limitation of Overvoltages in 110-500KV Electric Systems, CIGRE, 33-06 (1978)
- (9) B. Wahlstrom et al: Overvoltage Protection of Metal Enclosed SF<sub>6</sub> Substation Insulation Coordination Philosophy and Surge Arrester Characteristics, CIGRE, 33-03 (1976)
- (10) 岡田：ガス絶縁変電所の耐雷設計                      昭51，電気四学会連合大会，16
- (11) IEC, Pub 38 第5版(1975)の修正版(Aug. 1977)
- (12) ANSI C 92.2-1978
- (13) USSR National Standard No721 1977
- (14) H. W. Dommel et al: Computation of Electro-magnetic Transients, IEEE Vol62 No7 July (1974)
- (15) W. S. Price S. C. Bartlett & E. S. Zobel: Trans. Amer. Inst. Electrical Engineers 75-III 583 (1956)
- (16) H. L. Roden, E. S. Zobel & G. D. Lipper: Pwr Apparatus and System No33, 954 (1957)
- (17) C. J. Miller: Trans. Amer. Inst. Electrical Engineers 75-III 897 (1956)
- (18) 電力中央研究所，送電線耐雷設計基準要綱 71037 P178-179
- (19)                      “ 送電線耐雷設計ガイドブック 175031 P140-141
- (20) 川合幹雄：送電線鉄塔の衝撃電圧特性                      電気学会誌 34-33



- (21) M. Kawai: Studies of the Surge Response on a Transmission Line Tower  
IEEE Jan 1964 P30-34
- (22) 木下、松村、尾崎: 関西電力の500KV実系統におけるサージ試験結果  
電気学会誌 昭52-5 52B29
- (23) 石井ほか; 500KV2回線実送電線の雷サージ特性の実測  
昭54, 電気学会関西支部連合大会 G4-22
- (24) C. A. Jordan: Lightning Computation for Transmission Lines with  
Overhead Ground Wires, Part III, G. E. Review vol 37 1934 P243
- (25) S. A. Schelkunoff: Principal and Complementary Waves in Antennas,  
Proceedings of I.R.E Jan. 1946 P23
- (26) C. F. Wagner et al: A new approach to the calculation of the lightning  
performance of transmission lines III - a simplified method, stroke to  
tower, AIEE Trans. vol 79 PP589-603 Oct. 1960
- (27) R. Lundholm et al: Calculation of Transmission Line Lightning  
Voltages by Field Concepts, AIEE Trans pt III Feb 1958 P1271-1283
- (28) R. Lundholm: Overvoltage in a Direct Lightning-Stroke to a  
Transmission-Line Tower Cigre Reports 333, 1958
- (29) M. A. Sargent et al: Tower Surge Impedance, IEEE Trans.  
Vol PAS-SS No5 May 1969 P680-687
- (30) G. D. Breuer et al: Field Studies of the Surge Response of a 345KV  
Transmission Tower and Ground Wire, AIEE Trans. pt III Vol. 76 Feb.  
1958, P1392-96
- (31) 林ほか: スケールモデルによる送電線鉄塔進行波特性の基礎的検討, 電気学会誌 42-7
- (32) (20)と同じ
- (33) 林ほか: 第2京大法による送電線鉄塔のサージ・インピーダンスの測定  
昭37, 電気四学会連合大会 632
- (34) 松村ほか: 新北幹休止線路における雷事故模擬試験結果  
関西電力総研報告 第24号 11
- (35) 河村ほか: 500KV2回線特殊型鉄塔のインピーダンスの測定  
昭54, 電気関係学会関西支部連合大会 G4-21

- 36 34と同じ
- 37 河村ほか：送電線鉄塔・電線のサージ特性 昭52，電気学会全国大会 1347
- 38 20と同じ
- 39 山田：送電線鉄塔の進行波特性に関する基礎的研究
- 40 林ほか：大地に垂直な導線に沿う進行波の伝搬特性 昭35，電気四学会連合大会 905
- 41 25と同じ
- 42 福田ほか，超高圧送電線異常逆閃絡に関する一考察 昭33，電気四学会連合大会 574
- 43 E. C. Sakshang: Influence of Rate of Rise on Distribution Arrester Protective Characteristics, IEEE F78-174-5(1978)
- 44 E. C. Sakshang et al: A New Concept in Station Arrester Design, IEEE F76 393-9 PAS-96 (1977)
- 45 S. Tominaga et al: Electrical Properties of Zinc Oxide Valve for a Surge Arrester, IEEE A78595-1 (1978)
- 46 L. Dübe et al: Simulation of Control Systems in Electromagnetic Transients Program with TACS IEEE PICA Conf.
- 47 松村ほか：550KV Full GIS 雷サージ特性 昭52，電気学会全国大会 G2-940
- 48 松村ほか：500KV 新型ガス絶縁母線の開発 昭53，電気学会関西支部連合大会 G3-57
- 49 中央電力協議会，技術開発専門委員会，UHV 送電技術開発中間報告書 昭53. 9. 13
- 50 49と同じ
- 51 49と同じ
- 52 電力中央研究所：発電所耐雷設計ガイドブック No.175034 昭51. 3
- 53 22と同じ
- 54 安生ほか：鉄塔各部の電位分布に対する接地抵抗の影響 昭43. 電気四学会連合大会 954
- 55 松村ほか：送電線から変電所へ侵入する雷波形の観測 昭52，電気学会関西支部連合大会 G4-4
- 56 松村ほか：架空送電線から変電所へ侵入する雷波形の観測  
昭55，電気学会関西支部連合大会 G4-33
- 57 古野ほか：簡易キャパシタンス型分圧器の開発 電力中央研究所報告 176005 昭51.7
- 58 電力中央研究所 UHV 送電特別委員会機器部会第2次中間報告書 昭54.7
- 59 52と同じ
- 60 JEC203(1978) 避雷器4・3

- 61) 村野ほか：試験方法についての考察 昭 5 3. 電気四学会連合大会 1 6
- 62) 58 と同じ
- 63) 阿澄ほか：SF<sub>6</sub> ガス絶縁機器の保護協調，電気学会誌 昭 5 2 - 5 P 3 8 2

## 謝

## 辞

今回の研究遂行にあたっては、京都大学工学部上之園親佐教授に永年にわたり御懇篤な御指導と格別の御鞭達を賜った。お陰をもって、この論文をとりまとめることができたものと心から深く感謝し厚く御礼申し上げる。

また、京都大学工学部木嶋昭教授、林宗明教授、卯本重郎教授、板谷良平教授および岡山大学工学部中田高義教授には再三にわたり種々の御教示と親切な助言を戴いた。これら諸先生方に厚く御礼申し上げる。

次に、筆者の奉職する関西電力株式会社関係では、先ず今回の研究について動機づけと御鞭達を頂戴した当時の総合技術研究所松本肇所長〔現 日新電機㈱専務取締役〕に厚く御礼申し上げる。

次に、飯田正美、飯田孝三の歴代の総合技術研究所担務の常務取締役および歴代の研究所長には、研究推進について種々の御配慮を頂戴した。こゝに、深く感謝する。

また、森井清二常務取締役には、今回の研究の成果を最終的に論文の形にとりまとめ発表することについても格別の御理解を頂戴した。心から深く感謝し、厚く御礼申し上げる。

また、かつて関西電力の変電課時代の上司としてお仕えして以来、常々種々の御指導を頂戴し、今回も格別の御高配を賜った大トー株式会社小川三樹雄社長に心から深く感謝する。

その他、耐雷設計全般について御指導を頂いた大阪大学工学部木下仁志教授、電力中央研究所電力技術研究所有働竜夫所長、電力中央研究所武山試験・研究センター尾崎勇造所長をはじめ多くの関係各位に厚く御礼申し上げる。

三菱電機株式会社の方々には、GISの開発以来、種々の御協力を頂いているが、今回も500KVGISにおけるサージ特性の実測をはじめ、EMTPによる計算などで多くの御協力を頂いた。特に、EMTPによる計算では伊丹製作所の安田賢氏にお世話になった。厚く御礼申し上げる。

最後に、種々の御協力を得た関西電力・総合技術研究所の石原啓司主任研究員、樋口武光副主任研究員および現地実測において寒暑を問わず、常々御協力を頂いている関電阪急商事株式会社大阪北支店の関係各位に厚く御礼申し上げる。

118 項欠

## 付録 1 EMTP (TACSを含む) の概要について

### 1. EMTP の概要

EMTP (Electro Magnetic Transient Program) は米国ボンネビル電力局 (Bonneville Power Administration - BPA と略-) の Dr. H. W. Dommel (現在 British Columbia 大学教授) が中心となって多くの人々が共同で 1968 年頃開発したプログラムである。最初は、主としてサージ計算を目的としていたが、その後、発電機、AVR 等の制御機器、サイリスタ等の新しいエレメントも加わり、広く一般の過渡現象解析用プログラムとなっており、その規模はカードにして約 50,000 枚のステートメントからなる巨大なものである。

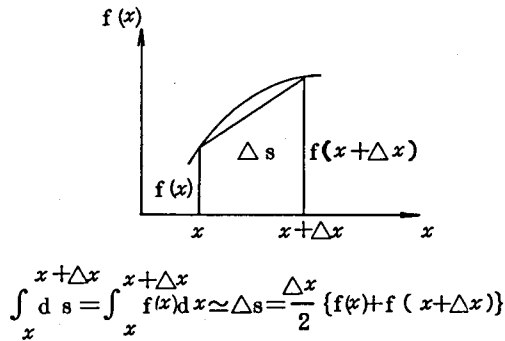
現在、この仕事は Dr. Scott Meyer に受けつがれており、さらに新しいエレメントの追加が続けられ、以前の Old Version (BPA における 1975 年 8 月の Version) に代って New Version (Model 21=21 版および Model 23) が広く用いられるが、これによると 300 ノード程度の回路まで処理可能で、このときのソースプログラムの所要メモリは 380 Kbit 程度、また、計算所要時間は 39 ノード 41 ブランチの集中定数回路で 400 ステップ計算を行なって IBM 370/168 で 10 秒 (CPU) 程度と極めて早くなっている。

使用言語は、低レベルの FORTRAN で、原則的にはプログラムの書き換えやコード変換を要せずどのメーカーの機種でも利用できるようになっており、アメリカの大半の電力会社、重電メーカーをはじめとし、カナダ、西欧諸国の大半、ブラジル、ユーゴスラビア、台湾など世界の各国で広く利用されている。わが国には、同志社大学工学部 雨谷 昭 弘 助教授によって導入され、電中研、重電メーカー、電力会社等で Model 21 が広く利用されている。

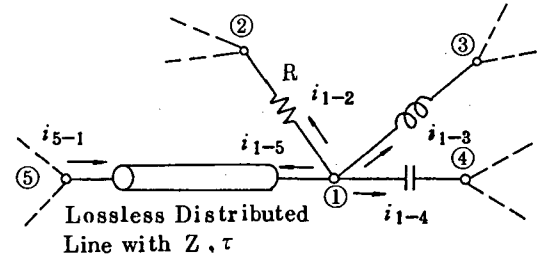
EMTP の開発は、これまでに 50 万米ドル以上を要し、さらに、今後 5 年程度の間に 200 万ドル以上を要するものといわれている。

### 2. EMTP による計算の原理と特長

EMTP による計算の原理は、Schynder-Bergeron 法を基礎とし、これをさらに発展させたもので、付 1-1 図に示すように、微分方程式を台形近似によって直接解く方法を用いており、基本要素に対する解法は以下に述べるようになっている。



付 1-1 図 台形近似による計算法



付 1-2 図 ノード 1 における電流分布

(1) 単相回路網の解法 (ノード法による)

付 1-2 図のノード①に着目し、時刻  $t$  の解を求める。ただし、 $t - \Delta t$ 、 $t - 2\Delta t$ 、…… は求まっているものとする。キルヒホッフの法則により、

$$i_{1-2}(t) + i_{1-3}(t) + i_{1-4}(t) + i_{1-5}(t) = i_1(t) \quad (1)$$

が成立する。もし電流源がなければ  $i_1(t) = 0$  となる。

いま、

$$(\text{抵抗 } R) \quad i_{1-2}(t) = \frac{1}{R} \{v_1(t) - v_2(t)\} \quad (2)$$

$$(\text{インダクタンス } L) \quad v_1 - v_3 = L \frac{di_{1-3}}{dt} \quad (3)$$

差分方程式になおし、台形近似を適用すると

$$\frac{v_1(t) - v_3(t) + v_1(t - \Delta t) - v_3(t - \Delta t)}{2} = L \frac{i_{1-3}(t) - i_{1-3}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4)$$

$$i_{1-3}(t) = \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t) - v_3(t)\} + I_{1-3}(t - \Delta t) \quad (5)$$

$$\text{ただし、} I_{1-3}(t - \Delta t) = i_{1-3}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t - \Delta t) - v_3(t - \Delta t)\} \quad (6)$$

past history の項

$$(\text{キャパシタンス } C) \quad i_{1-4}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t) - v_4(t)\} + I_{1-4}(t - \Delta t) \quad (7)$$

$$\text{ただし、} I_{1-4}(t - \Delta t) = -\frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t - \Delta t) - v_4(t - \Delta t)\} - i_{1-4}(t - \Delta t) \quad (8)$$

past history の項

(分布定数線路)

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = L' \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial t} = C' \frac{\partial v}{\partial t} \quad (9)$$

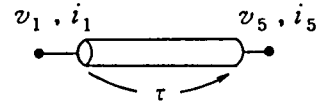
$$\therefore \left. \begin{aligned} i &= F(x - \alpha t) + f(x + \alpha t) \\ v &= Z \cdot F(x - \alpha t) - Z \cdot f(x + \alpha t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{ただし、} Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \text{サージインピーダンス}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{L' C'}} \quad \text{伝搬速度}$$

$$(10) \text{式より } v + Z \cdot i = 2 Z F(x - \alpha t) \quad (11)$$

いま、 $\tau = \frac{\text{線路長}}{\alpha}$  : 伝搬時間とすると



$$v_1(t) + Z(-i_{1-5}(t)) = v_5(t - \tau) + Z \cdot i_{5-1}(t - \tau) \quad (12)$$

$$i_{1-5}(t) = \frac{1}{Z} v_1(t) + I_{1-5}(t - \tau) \quad (13)$$

$$\text{ただし、} I_{1-5}(t - \tau) = -\frac{1}{Z} v_5(t - \tau) - i_{5-1}(t - \tau) \quad (14)$$

past history の項

以上の(2)、(5)、(7)、(13)を(1)に代入すると、

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{R} + \frac{\Delta t}{2L} + \frac{2C}{\Delta t} + \frac{1}{Z} \right) v_1(t) - \frac{1}{R} v_2(t) - \frac{\Delta t}{2L} v_3(t) - \frac{2C}{\Delta t} v_4(t) \\ &= i_1(t) - I_{1-3}(t - \Delta t) - I_{1-4}(t - \Delta t) - I_{1-5}(t - \tau) \end{aligned} \quad (15)$$

となる。これはノード①に関するものであるが、これをすべてのノードについて求める

$$\text{と} \quad [G][v(t)] = [i(t)] - [I] \quad (16)$$

ただし、 $[G]$  = ノードのコンダクタンスマトリックス

$[v(t)]$  =  $n$  個のノード電圧の列

$[i(t)]$  = 電流源の列

$[I]$  = past history の項の列

のようになる。ここで $[G]$ のうち、電流指定ノードをA、電圧指定ノードをBとする

$$\text{と} \quad \begin{bmatrix} G_{AA} \\ G_{BA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{AB} \\ G_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad (17)$$

となり、 $[v_A]$ に関してとくと

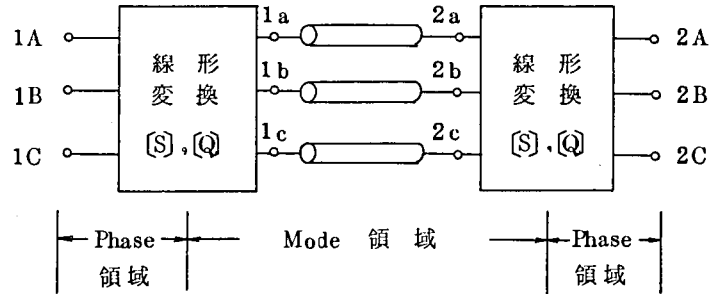


$$[GAA][v_A(t)] = [i_A(t)] - [I_A] - [GAB][v_B(t)] \quad (18)$$

となる。(18)式の右辺は既知であるので $[GAA]^{-1}$ を乗ずれば $[v_A]$ が求まる。以下、タイムステップを進めていくことにより、解が順次求められる。

## (2) 3相回路の解法

3相回路の場合は、まず線形変換 $[S]$ 、 $[Q]$ を施してPhase領域からMode領域に変換する。これにより、各Modeについては単相と同じ扱いとなり、



$$\left. \begin{aligned} i_{1a-2a}(t) &= \frac{1}{Z_a} v_{1a}(t) + I_{1a-2a}(t-\tau_a) \\ i_{1b-2b}(t) &= \frac{1}{Z_b} v_{1b}(t) + I_{1b-2b}(t-\tau_b) \\ i_{1c-2c}(t) &= \frac{1}{Z_c} v_{1c}(t) + I_{1c-2c}(t-\tau_c) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

付1-3図 3相回路のphase領域からMode領域への変換

また、past history は

$$I_{1a-2a}(t-\tau_a) = -\frac{1}{Z_a} v_{2a}(t-\tau_a) - i_{2a-1a}(t-\tau_a) \quad (20)$$

となる。このようにして求めたMode領域の量を

$$\left. \begin{aligned} [i_{1-2 \text{ phase}}] &= [Z \text{ phase}]^{-1} \cdot [v_{1 \text{ phase}}] + [I_{1-2 \text{ phase}}] \\ \text{ただし、} [Z \text{ phase}]^{-1} &= [Q][Z \text{ mode}]^{-1} [S]^{-1} \\ [I_{1-2 \text{ phase}}] &= [Q][I_{1-2 \text{ mode}}] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

のようにPhase領域にもどせば解が求まる。

## (3) 平衡多相送電線の場合

送電線が完全に対称に配置されている場合、送電線の $[Z']$ 、 $[Y']$ 行列は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} [Z'] &= \begin{bmatrix} Z_s' & Z_m' & Z_m' \cdots Z_m' \\ Z_m' & Z_s' & Z_m' \cdots Z_m' \\ Z_m' & Z_m' & Z_s' \cdots Z_m' \\ Z_m' & Z_m' & Z_m' \cdots Z_s' \end{bmatrix} \\ [Y'] &= \begin{bmatrix} Y_s' & Y_m' & Y_m' \cdots Y_m' \\ Y_m' & Y_s' & Y_m' \cdots Y_m' \\ Y_m' & Y_m' & Y_s' \cdots Y_m' \\ Y_m' & Y_m' & Y_m' \cdots Y_s' \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

このような平衡した回路の定数を Mode 領域に変換するには、

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1-M & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & 1-M & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1-M \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

の  $[S][Q]$  マトリックスをとればよく、その結果 Mode 領域の量としては、

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{mode}-1'} &= Z_s' + (M-1)Z_m' \\ C_{\text{mode}-1'} &= C_s' + (M-1)C_m' \end{aligned} \right\} \quad (26) \quad \left. \begin{aligned} &\text{零相 (大地帰路 Mode)} \\ &\text{に対応} \end{aligned} \right\}$$

Mode 2 …… M に対しては、

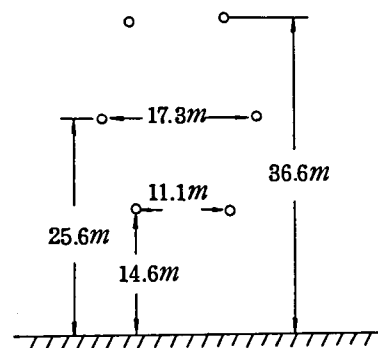
$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{mode}-i'} &= Z_s' - Z_m' \\ C_{\text{mode}-i'} &= C_s' - C_m' \end{aligned} \right\} \quad i=2, \dots, M. \quad (27) \quad \left. \begin{aligned} &\text{正、逆相に対応} \end{aligned} \right\}$$

となる。

#### (4) 平行 2 回線送電線の場合

付 1-4 図のような平行 2 回線の場合(3)で扱ったような平衡回線としての扱いは必ずしも適当ではなく、10%前後の誤差を生ずることがある。そこで、平行回線を表現するのに、

$$[Z'] = \begin{bmatrix} Z_{s'}' & Z_{m'}' & Z_{m'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' \\ Z_{m'}' & Z_{s'}' & Z_{m'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' \\ Z_{m'}' & Z_{m'}' & Z_{s'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' \\ \hline Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{s'}' & Z_{m'}' & Z_{m'}' \\ Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{m'}' & Z_{s'}' & Z_{m'}' \\ Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{p'}' & Z_{m'}' & Z_{m'}' & Z_{s'}' \end{bmatrix} \quad (28)$$



の形のマトリックスを用いると、 $[S][Q]$ は

$$[S] = [Q] = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & -1 & 2 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -4 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 2 & -4 \end{bmatrix}$$

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

付1-4図 平行2回線送電線の相配列の例

となり、このような形のまま、分布定数回路として扱うことが可能となる。

#### (5) 分布定数回路の周波数特性

零相の  $R'$ ,  $L'$  が 付1-1

付1-1表 大地帰路の場合のパラメータ

表のように周波数によって変化する場合は厳密解を求めるには、送電線上の  $k$  点、 $m$  点の前進波、後進波をそれぞれ  $f_k, b_k, f_m, b_m$  としたとき

$f$ (Hz)	$10^{-1}$	$10^0$	$10^2$	$10^4$	$10^6$
$R'$ ( $\Omega/km$ )	0.019	0.022	0.302	19.4	453.0
$L'$ (mH/km)	5.50	4.82	3.46	2.29	1.77

き

$$\left. \begin{aligned} b_k(t) &= v_k(t) - Z_1 \cdot i_k(t) & b_m(t) &= v_m(t) - Z_1 \cdot i_m(t) \\ f_k(t) &= v_k(t) + Z_1 \cdot i_k(t) & f_m(t) &= v_m(t) + Z_1 \cdot i_m(t) \\ Z_1 &= \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z(j\omega) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

において

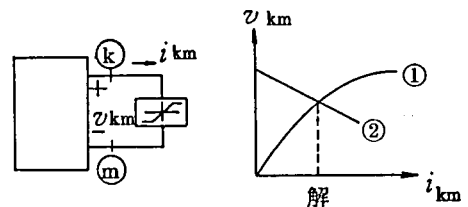
$$\left. \begin{aligned} b_k(t) &= \int_0^\infty \{ a_1(u) f_m(t-u) + a_2(u) f_k(t-u) \} du \\ b_m(t) &= \int_0^\infty \{ a_1(u) f_k(t-u) + a_2(u) f_m(t-u) \} du \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

ただし、 $a_1(u)$ 、 $a_2(u)$ はあらかじめ逆フーリエ変換で求められた重み関数

のように畳み込み積分をすれば求められる。

#### (6) 非線形素子

非線形素子は付1-5図のように、線形部分で成り立つ関係（これは直線で与えられる）と非線形の関係との交点を求める形で解を求める。



付1-5図 非線形素子の解の求め方

#### (7) 避雷器（従来形の場合）

非線形V-I特性をベースに、ギャップと組合せて用いる。

#### (8) 発電機、変圧器、負荷

発電機は対称3相電圧 $E^*$ と $X_d'$ で表わす。

励磁インピーダンスを省略した2巻線変圧器は

$$\begin{bmatrix} Y & -tY \\ -tY & t^2Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

で表わす。抵抗を省略した場合には

$$[L]^{-1} = j\omega \begin{bmatrix} Y & -tY \\ -tY & t^2Y \end{bmatrix} \quad (34)$$

となる。線形励磁インピーダンスが必要な場合には、これを励磁アドミッタンスで表わし、

$$[Y]^{-1} = R + j\omega[L] \quad (35)$$

で表わす。

負荷についても同様である。

### (9) EMTPの特長

以上のとおり、EMTPの計算原理は、分布定数線路を含む電力系統のすべての素子を等価電流源(Past historyの項)と抵抗の形で置換し、この等価回路においてノード方程式を立て、コンダクタンス行列の逆行列をとることにより解を求めようとするものであるが、通常の電力系統に対するノードコンダクタンス行列が多数の零要素を含むことに注目して、スパース処理を施すことにより、逆行列計算を大巾に簡略化することにより任意の大規模電力系統におけるサージ計算を全く機械的かつ高速度で処理し得る汎用プログラムの開発が可能になった点が大きな特長である。

### 3. EMTPの適用範囲

EMTPのフローチャートは付1-6図のとおりで直接には電力系統に発生する各種の過渡現象の計算を目的としたものであるが、単に電力系統に限らず、一般の電気回路はもちろん、下記のエレメントの組合せよりなる回路、もしくはこの回路で等価的に表現されるものであれば対象とすることができる。

#### (1) 線形エレメント

##### a. 集中抵抗

$$\text{○} \text{---} \text{---} \text{---} \text{○} \quad v = Ri$$

##### b. 集中インダクタンス

$$\text{○} \text{---} \text{---} \text{---} \text{○} \quad v = L \frac{di}{dt}$$

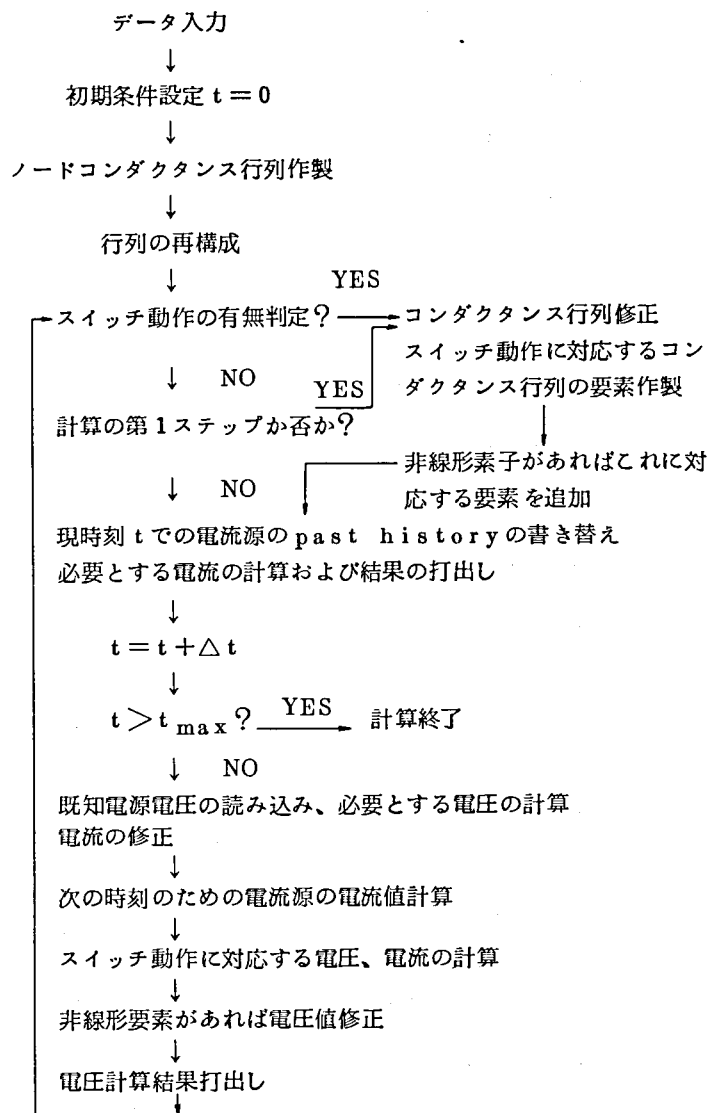
##### c. 集中キャパシタンス

$$\text{○} \text{---} \text{---} \text{---} \text{○} \quad i = C \frac{dv}{dt}$$

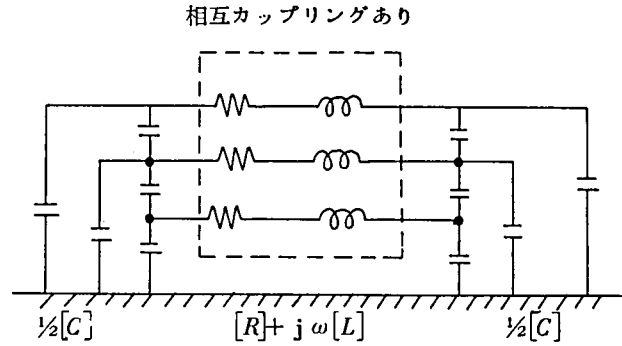
##### d. 集中定数多相 $\pi$ 型等価回路

(相互誘導を含む)

$R, L, C$  は正方対称行列で表わされる。



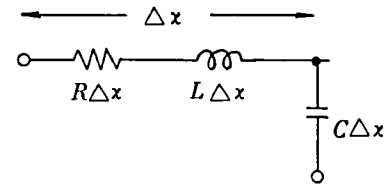
付1-6図 EMTF フローチャート



e. 多相分布定数回路

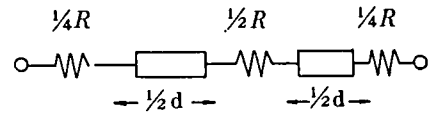
(a) 単相分布定数回路

無垂で損失を抵抗で表わしたモデル



(b) 3相1回線分布定数回路

正相、零相の定数（サージインピーダンス、伝搬時間、抵抗）を与える。



(c) 3相2回線分布定数回路

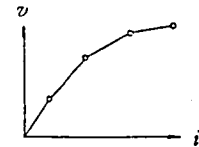
正相、零相第1、零相第2各回路の定数を与える。

(d) 周波数特性

(2) 非線形エレメント

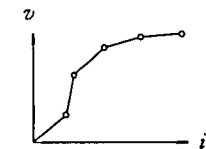
a. 非線形抵抗（避雷器など）

原点を通る一価関数で表現し、折線で表わす。

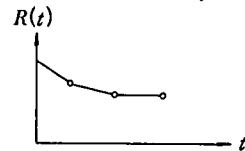


b. 非線形インダクタンス（変圧器の励磁インピーダンスなど）

原点を通る折線の一価関係で表わす。



c. 時変抵抗（しゃ断器の投入抵抗の多段切替えのシュミレーションなど）



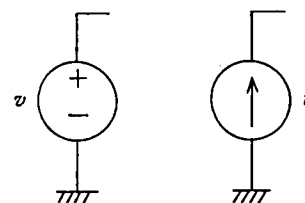
d. スイッチ（しゃ断器の開閉、避雷器のギャップ放電、回路の接続状態の変化など）

時間制御スイッチ、電圧制御スイッチ、統計スイッチの3種類がある。



### (3) 電圧源および電流源

標準関数 (Sine、サージ関数、ステップ関数、ランプ関数) の他、時間関数として各時間の数値を与えることができる。



### (4) 機 器

#### a. 同期機 (対称 3 相形)

電気側は Park の式で表現され、機械系は質量、バネ、制動で表現される。励磁機や調速機も含めることができる。

#### b. 変 圧 器

飽和特性、ヒステリシス、残留磁束、構造も考慮できる。

#### c. サイリスタ、ダイオード

TACS と組合せて直流系の解析が可能である。

#### d. 限流ギャップ付避雷器

### (5) 制 御 系

制御用プログラム TACS によって任意の制御ブロックを組んで回路にフィードバックがかけられる。

なお、EMTP の初期条件は、電圧・電流源がすべて同一周波数の Sine 関数で表わされる場合には微分方程式の初期値はプログラムが自動的に計算するが、別に初期条件を設定することも可能である。また、出力形式としては要求した変数 (電圧・電流) が時間の関数として得られ、プリンタおよびプロッタ出力が可能である。

## 4. TACS の概要

### (1) 開発の目的

TACS (Transient Analysis of Control System) は、EMTP において HVDC 変換器のモデルが取り扱えるようになるに従い、細かい制御アルゴリズム等の検討にはパッケージ化された制御機能がつくことが望ましいので、Mr. L. Dübe により開発された制御回路用プログラムであって、計算プロセスを電気回路から独立して計算できるようにするために、電気回路とのインターフェイスは相互に 1 タイムステップの遅れを伴って転送するようにした点が大きな特長である。

## (2) TACS のプログラム

TACSでは、伝達関数、ゲイン、リミッタ等のブロックの組合わせで表現され、付1-7図のように入出力に6つの名前をつける。

基本的なブロックは以下のとおりである。

### a. 基本ブロック

#### (a) 伝達関数またはSブロック

(付1-8図)

#### (b) Zero-Order S block

(付1-9図)

加算器として用いる。

#### (c) リミッター (付1-10図)

静的なものゝ動的なものがある。

### b. 代数的・論理的機能ブロック

(付1-11図)

加減乗除、論理演算を行う。

### c. 特殊素子

#### (a) 周波数センサー

#### (b) リレーにより動作するスイッチ

#### (c) 遅延ブロック

#### (d) パルス遅延素子

#### (e) 量子化器

#### (f) 任意の非線形関数

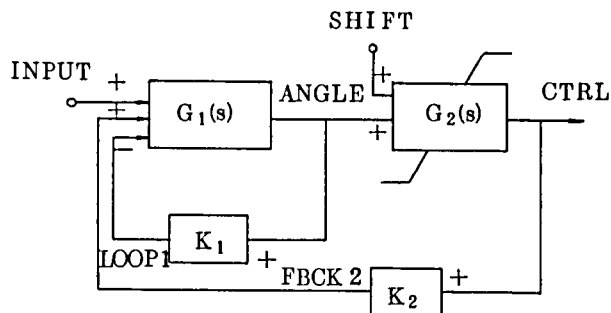
#### (g) 時間制御スイッチ

### d. 信号源

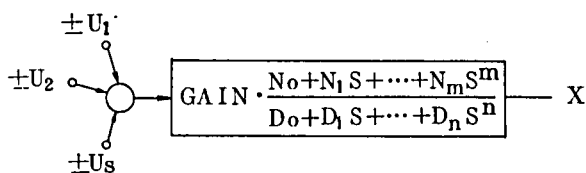
#### (a) 直流、ステップ、パルス

#### (b) 正弦波 (振巾、周波数、位相は任意)

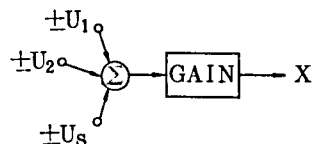
#### (c) その他ユニット関係、秒単位のシュミレーション時間 $t$



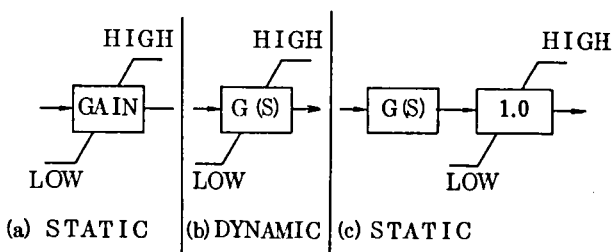
付1-7図 代表的ブロック線図



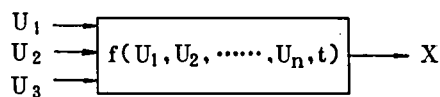
付1-8図 伝達関数



付1-9図 Zero-Order S block



付1-10図 Static and dynamic limiters



付1-11図 代数的・論理的機能ブロック



要するに、EMTPのノード電圧、枝電流、スイッチ状態などの変数を入力信号とできる。

### (3) 解 法

#### a. 線形部分の解法

伝達関数のS領域で表現されたものは、時間領域の微分方程式になおし、台形近似を用いて解く。これにより、n次の伝達関数も、中間で出てくる2次以上の入、出力変数が消去されて、次のような1次の差分方程式となる。

$$C_0 X(t) = d_0 u(t) + HIST_1(t - \Delta t) \quad (36)$$

ここで $u(t)$ は入力之和であり、n個のpast historyは次のように書き替えられる。

$$\begin{aligned} HIST_1(t) &= d_1 u(t) - c_1 X(t) - HIST_1(t - \Delta t) + HIST_2(t - \Delta t) \\ &\vdots \\ HIST_i(t) &= d_i u(t) - c_i X(t) - HIST_i(t - \Delta t) + HIST_{i+1}(t - \Delta t) \\ &\vdots \\ HIST_n(t) &= d_n u(t) - c_n X(t) \end{aligned} \quad (37)$$

係数 $c_i$ 、 $d_i$ は伝達関数の係数より決まり、

$$d_i = d_{i-1} + (-2)^i \left[ \binom{i}{i} M_i + \binom{i+1}{i} M_{i+1} + \dots + \binom{n}{i} M_n \right]$$

ただし、 $\binom{i}{j} = \text{binomial coefficients}$ ,

$$M_i = (2 / \Delta t)^i N_i$$

$$d_{-1} = 0 \quad (38)$$

となる。

また、Zero-orderブロックはpast historyのない代数方程式となるので、すべてを合せると、

$$\sum_j a_{ij} X_j(t) = b_i$$

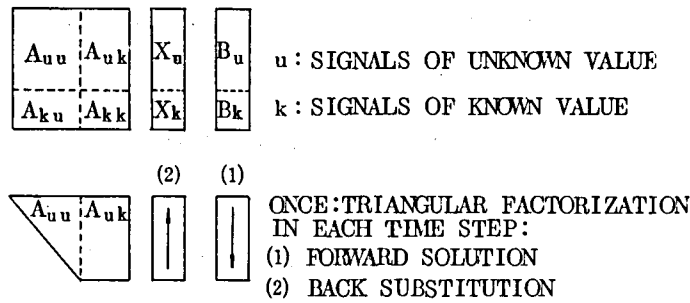
の形となる。

(39)

この線形の代数方程式を付1-12図のようにして解くと解が得られる。

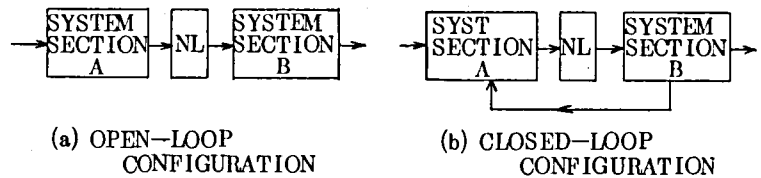
#### b. 非線形機能

非線形機能は(39)式の形で直接解くことはできないが、Sequentiallyには解くことができる。この方法によっても付1-13図(a)のようにOpen-loopの場合には厳密解が得られるが、同図(b)のようにclosed-loopになると正確ではなくなる。そこで、EMTPでは計算のきざみ巾 $\Delta t$ が10～200 $\mu$ Sと制御系のタイムコンスタントに



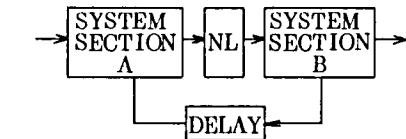
付1-12図 Simultaneous solution of linear algebraic equations.

比べて非常に小さくとられる  
ことに着目して、TACSでは  
同図(c)のように1 stepの  
おくれを入れて計算する手法  
を採用している。



#### C. 初期値

初期値については、 $t \leq 0$   
において原則として系は定常  
状態であると仮定しているが、  
指定することもできる。



付1-13図 Treatment of nonlinear functions  
(N.L.=nonlinearity)

#### (4) 電力系統の過渡現象への応用

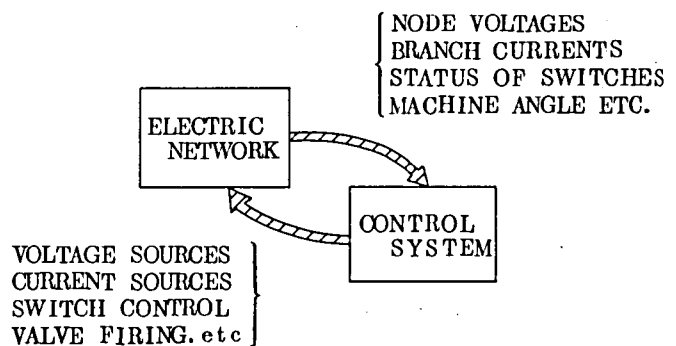
TACSはEMTPと結合されるようになっていて、電気系はEMTPで制御系は  
TACSで計算される。

##### a. 電気回路の表現

EMTPで用いる素子はすべて使用可能である。

##### b. インターフェイスの扱い

電気回路と制御回路は、  
EMTPとTACSによって  
個別に解かれるが、付1-14  
図のように変数は相互にやり  
とりされる。TACSには、  
電気回路のノード電圧、枝電  
流、スイッチ状態その他の変数



付1-14図 電気回路と制御系の相互関係

が入力信号源として転送され、その出力信号が電気回路の電圧源または電流源として転送される。転送には $10 \sim 200 \mu s$ の1タイムステップの遅れを伴うが、これによる電気回路の誤差は無視できる程度のものである。

#### c. 適用の例

- (a) HVDC変換所 (バルブの制御・保護, 多端子系の解析)
- (b) 発電機の励磁制御 (SSRの解析)
- (c) モニター装置や保護装置の検証
- (d) 各機器の熱量や温度上昇の検証
- (e) 誘導機のモデル化
- (f) 同期調相機や飽和リアクトルの制御

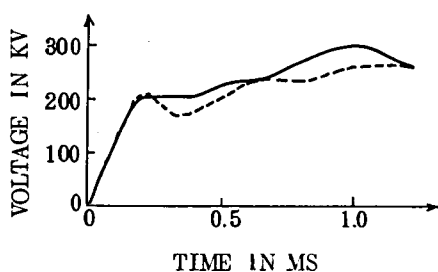
#### 5. EMTPにおける計算誤差

付1-15図～付1-17図に実測との比較を示すがよく一致した結果となっている。



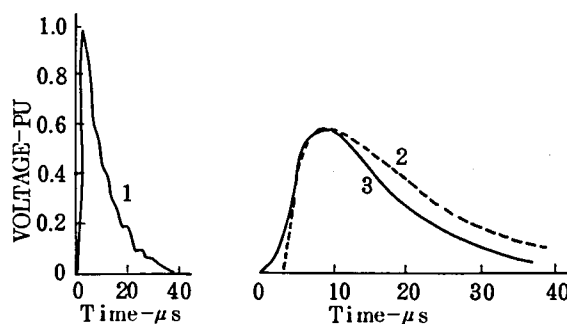
付1-15図

Harmonics following load rejection. Solid curve for measurements, dotted curve for simulation.



付1-16図

Transient recovery voltage. Solid curve for measurements dotted curve for digital simulation.



付1-17図

Impulse in ground-return mode of HV dc line. Curve 1-Sendig-end voltage. Curve 2-Measurement at 13.2 km. Curve 3-Digital simulation at 13.2 km

#### 6. EMTPおよびTACSの使用法

EMTPおよびTACSの使用に際しては、決められたFORMATに従ってデータ化しなければならない。その方法の詳細はマニュアルにゆずるが、構成カードと使用法の概要を簡単に述べる。なお、計算は一度のRUNでデータカードがなくなるまでくり返し実行され

るので、2つ以上の問題があればそれらのデータカードを順々に並べておけばよい。

EMTPのカードストリームは付1-18図のとおりであるが、※印のカードの終末には必ずBLANCKカードを挿入して、そのカードの終了を示さないとERRORとなりRUNしないので注意が必要である。

(1) JOBカード, JOBコントロールカード

計算番号、計算者、日時等の記載

(2) EMTFコントロールカード

BEGIN NEW DATA CASE カードとも呼ばれ、各問題ごとに、データカードの最初には必ず置かねばならない。

(3) MISCカード (Miscellaneous Data Cards)

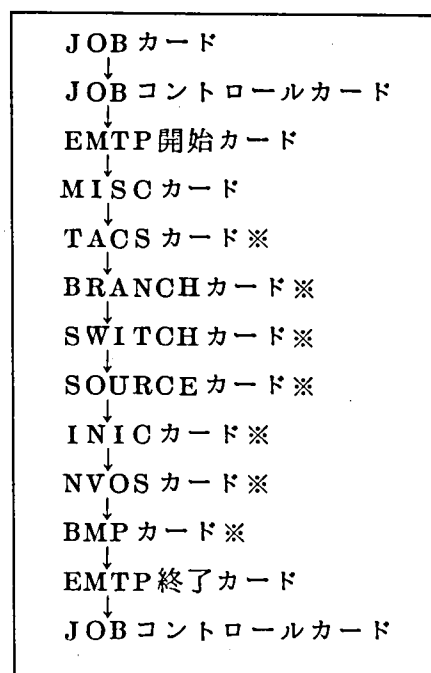
主として、計算制御カードで、第1カードには、計算さざみ時間、計算終了時間(いずれも単位は秒)などを、第2カードには出力周期、プロットに用いるデータの周期、回路の接続状態表示の要否、定常解印刷の要否、出力変数の絶対値最大の発生時刻とその値の印刷の要否、その他を指定する。計算結果の印刷の周期を途中で変更する場合には第3カードを使用する。

(4) TACSカード

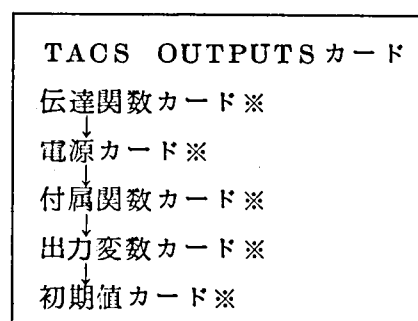
TACSを組み合わせて用いる場合には、「BEGIN NEW DATA CASE」カードと「MISC」カードの間にTACSの使用を示す「TACS EMTF SOURCES」を挿入し、TACSのカードとしては、付1-19図のストリームにより「MISC」カードの次に挿入する。TACSとEMTF間の転送変数は、「TACS EMTF SOURCES」カードと、「TACS OUTPUTS」カードで指定される。

(5) BRANCHカード

電気回路をノードとブランチで表現し、その間の回路定数等を指定するカードで、集



付1-18図 EMTFの  
カードストリーム



付1-19図 TACSカード  
の構成



※印はBLANCKカードである。

中定数、非線形抵抗、分布定数等を定められた FORMAT で 1 つのブランチに 1 枚のカードを使用して作成する。

(6) SWITCH カード

スイッチの両端の接続されているノード名、スイッチを ON および OFF する時刻 (単位秒) スwitchがOFFする場合のしきい値、スイッチをONすべき電圧 (Flash-over Voltage) 等を指定する。

(7) SOURCE カード

電源の種類 (直流、、、正弦関数、サージ関数、特殊波形、三相同期機、制御系からの出力)、電圧源か電流源か、振巾、周波数、位相、サージ関数の指数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、等を記入する。

(8) INIC カード (Initial Condition Cards)

初期条件を記入する。

(9) NVOS カード (Node Voltage Output Specification Cards)

出力を希望するノード電圧を指定する。

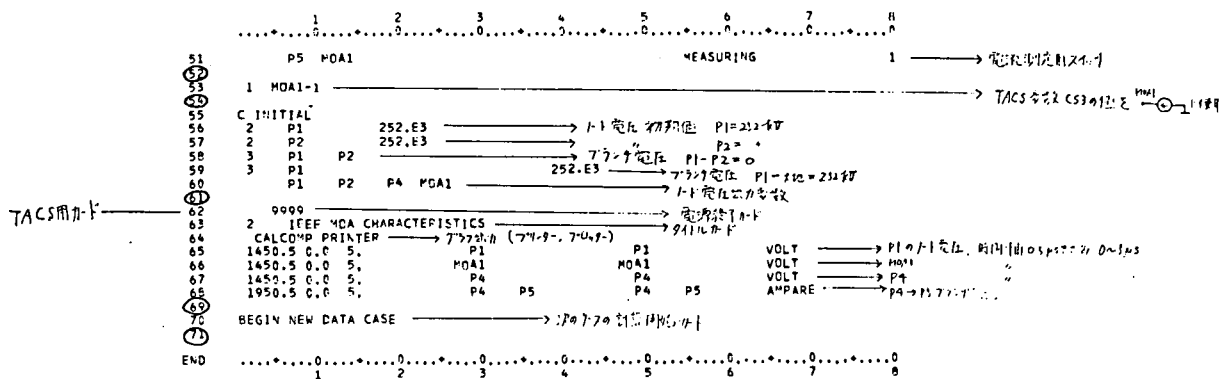
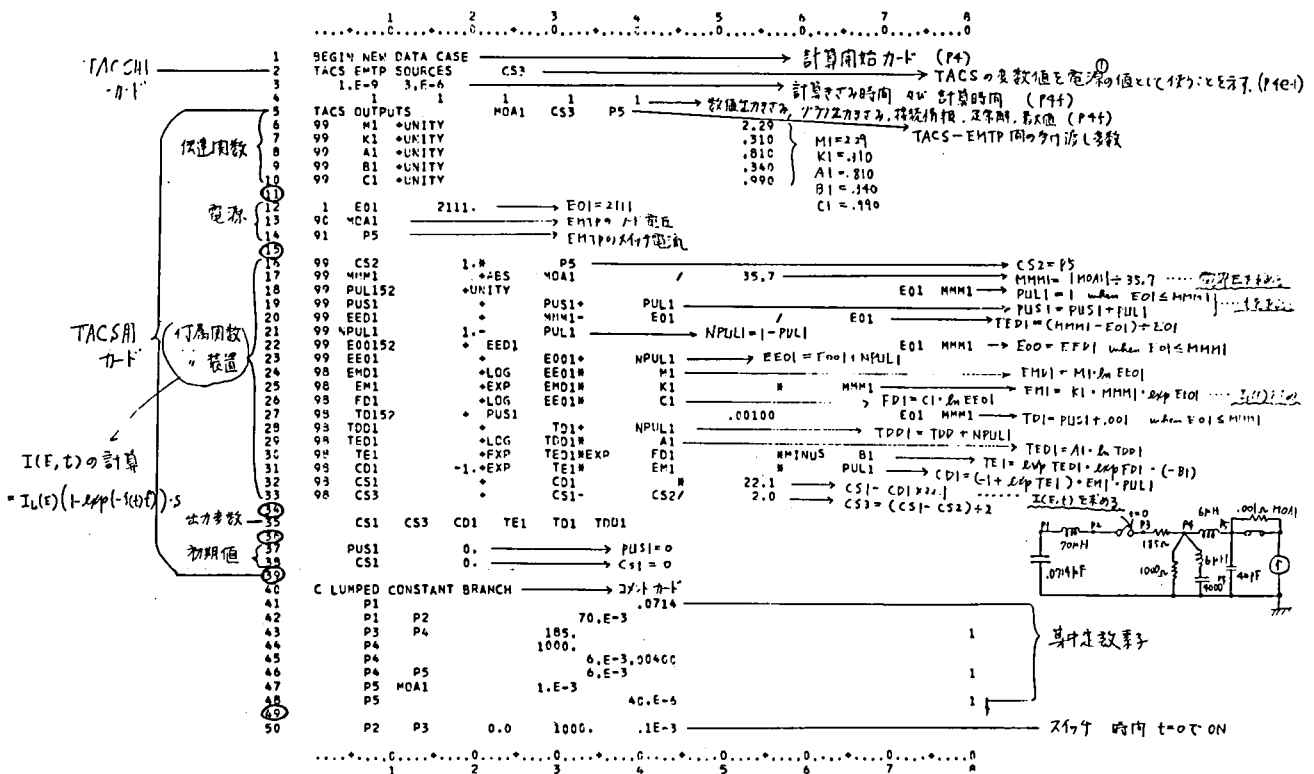
(10) BMP カード (Batch Mode Plotting Cards)

ノード電圧などをラインプリンタでグラフとして出力する場合に用いるカードで、リクエストカード、タイトルカード、サブタイトルカードに続き、出力の種類、横軸の単位、横軸のスケール、プロット開始の時間、プロット終了の時間、縦軸の下限の値、縦軸の上限の値、ノード名、ヘッディングタイトル、縦軸のラベルを指定したカードを必要枚数作成する。

(11) EMTP 終了カード、JOB コントロールカード

「BEGIN NEW DATA CASE」カードと BLANCK カードを設けて終了する。

以下、今回の解析に用いた一部を使用例として添付する。



INDEPENDENT LIST LIMITS FOLLOW:				TOTAL LENGTH OF		/LABEL/		EQUALS		INTEGER WORDS.											
150	200	400	25	500	25	500	2000	20	150	90	90	5	400	50	4	2	5	1	50	500	500
-----																					

DESCRIPTIVE INTERPRETATION OF NEW-CASE INPUT DATA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0

[illegible]

1) ONLY THE PHYSICAL CONNECTIONS OF  
2) REPEATED ENTITIES IN PARALLEL

- 3) SOURCES ARE OMITTED, ALTHOUGH SWITCHES ARE INCLUDED.

311 TERRA \* P24

P1	TERRA	P2		
P2	P1	P3		
P3	P2	P4		
P4	TERRA	TERRA	P3	P5
P5	TERRA	P4	MCA1	MCA1
Q1	P5	P5		
Q4	P1	P4	P4	P5

```

COMMENT CARD.                                1C INITIAL
NODE VOLT INIT COND. 0.2520 06 0.0          0 0 1 2 P1      252.E3
NODE VOLT INIT COND. 0.2520 06 0.0          1 2 P2      252.E3
LINEAR I.              0.0          0.0      1 3 F1      ?
LINEAR I.              0.0          0.2520 06 0.0      1 3 P1      252.E3
CARD OF BUS NAMES FOR NODE-VOLTAGE OUTPUT.      1 P1      ? 4 NOA1
BLANK CARD ENDING NODE NAMES FOR VOLTAGE OUTPUT. 1

```

FIRST 4 OUTPUT VARIABLES ARE ELECTRIC-NETWORK NODE VOLTAGES (WITH RESPECT TO LOCAL GROUND)  
NEXT 0 OUTPUT VARIABLES ARE BRANCH VOLTAGES (VOLTAGE OF UPPER NODE MINUS VOLTAGE OF LOWER NODE)

- ```

NEXT 0 OUTPUT VARIABLES ARE CURRENTS (FLOWING FROM THE UPPER ENTP NODE TO THE LOWER)
NEXT 4 OUTPUT VARIABLES ARE BRANCH CURRENTS (FLOWING FROM THE UPPER ENTP NODE TO THE LOWER)
NEXT 0 OUTPUT VARIABLES PERTAIN TO DYNAMIC SYNCHRONOUS MACHINES, WITH NAMES GENERATED INTERNALLY
FINA 5 OUTPUT VARIABLES BELONG TO 'TACS' (NOTE INTERNAL-Y-ADDED UPPER NAME OF PAIR),
BRANCH POWER CONSUMPTION (POWER FLOW, IF A SWITCH) IS TREATED LIKE A BRANCH VOLTAGE FOR THIS GROUPING
BRANCH ENERGY CONSUMPTION (ENERGY FLOW, IF A SWITCH) IS TREATED LIKE A BRANCH CURRENT FOR THIS GROUPING.

```

[illegible][illegible]





## 付 録 2 ZnO 素子の定数について

### 1. ZnO 素子の 電圧—電流特性

ZnO 素子の典型的な電圧—電流特性の一例を示すと付 2—1 図のとおりである。

従来型の避雷器では、直列ギャップがあるため、避雷器の電圧—電流特性は直流ギャップの影響が大きく、例えばこれに用いられる SiC 素子の特性は、次の  $K$ 、 $\alpha$  の 2 つの定数を含む簡単な式で表わすことができた。

$$I = KV^\alpha$$

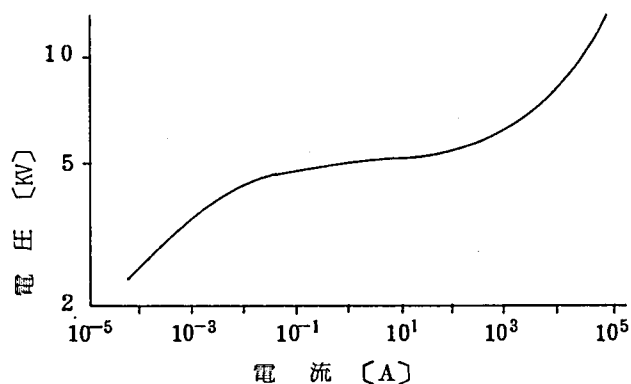
(1)

しかし、ZnO 避雷器ではギャップレスであるため、通常運転時にも対地運転電圧による微小電流が流れ、電流の範囲が  $10^{-5} \sim 10^5$  と広範囲であること、また、電圧—電流特性に時間効果があることから (1) 式のような簡単な式で特性を示すことは出来ないと考えられる。

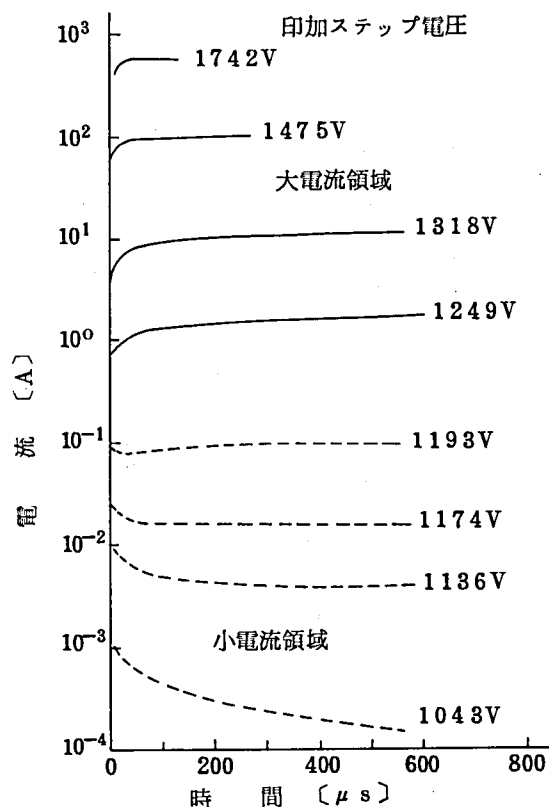
### 2. 電圧—電流特性の時間応答

電圧—電流特性にはパルス状電圧や電流を印加した場合に時間効果があり、付 2—2 図は、これを調べるために ZnO 素子に種々の波高値のステップ電圧を印加した場合に得られた電流応答の一例である。

印加電圧は  $1 \mu s$  以内に最終値に達し、そのレベルで一定値に保たれている。付 2—2 図の実験結果、低電圧を印加した場合には、電流は誘電体中の吸収電流のように時間の経過とともに次第に減少し、ZnO 素子は大きな吸収電流をもつ絶縁体のようにふるまっているが、高電圧を印加した場合の大電流領域では、電流は時間遅れの後に飽和している。



付 2—1 図 ZnO 素子の電圧—電流特性

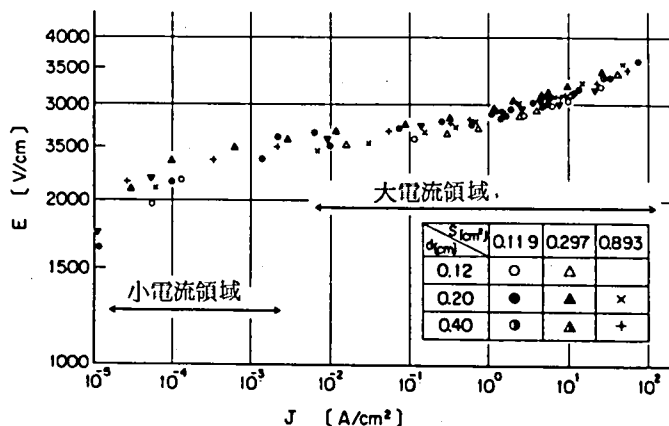


付 2—2 図 ステップ電圧に対する電流応答の例

### 3. ZnO素子の電界、電流密度による表現

ZnO素子の特性を論ずる場合、

個々の電圧－電流特性よりも一般的なZnO固有の電気特性によることができれば便利であり、この場合のパラメーターとしては、電界と電流密度が考えられる。いま、ZnO素子の電流分布が断面積 $S_z$ に一様であり、電圧は試料の高さ $L_z$ に沿って均等に分担されているものとするれば、ZnO素子そのものの特性を表



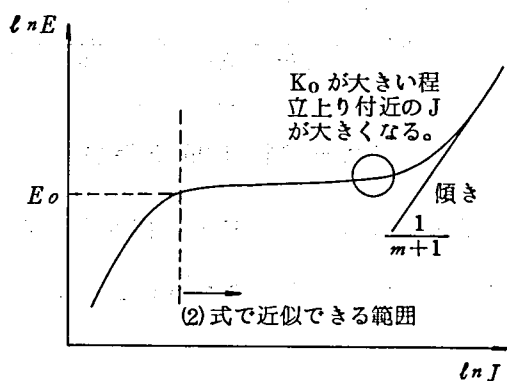
付2-3図 E-J特性の実験結果

わす $E = V/L_z$ と電流密度 $J = I/S_z$ のE-J特性は電圧－電流特性と同様の関係となるはずである。付2-3図は、種々の $S_z$ と $L_z$ をもつ素子について得られた実験結果で、全ての実験値を電圧－電流特性と同様の一つの曲線で示し得ることを示している。以下、E-J特性によって考察をすすめる。

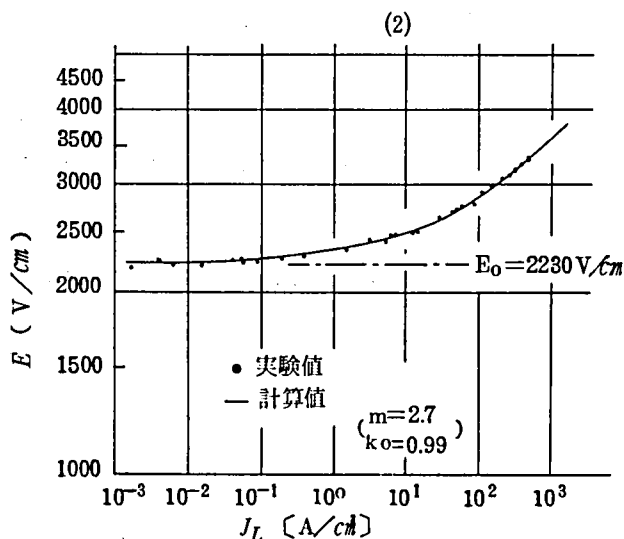
### 4. DC電圧を印加した場合のE-J特性

付2-3図は、印加電圧が高くなるとステップ電界 $E$ を印加した場合、電流密度 $J$ は極限值 $J_L$ に収束することを示している。この $J_L$ は直流電圧を印加したことに対応するから、付2-4図において $J_L \rightarrow 0$ のとき $E \rightarrow E_0$ の極限電界になるものとするれば、E-J特性は $E_0$ の値を用いて

$$\frac{J_L(E)}{E} = K_0 \left( \frac{E - E_0}{E_0} \right)^m$$



付2-4図 E-J特性と(2)式の範囲



付2-5図 (2)式と実験値の比較

で表わされる。ここに  $K_o$ 、 $E_o$ 、 $m$  は定数で、その意味するところは、付 2-4 図に示したが、既に 3 個の定数が必要となってきた。また、付 2-5 図は (2) 式による E-J 特性と実験結果との比較でよく一致していることを示している。

## 5. E-J 特性の時間効果

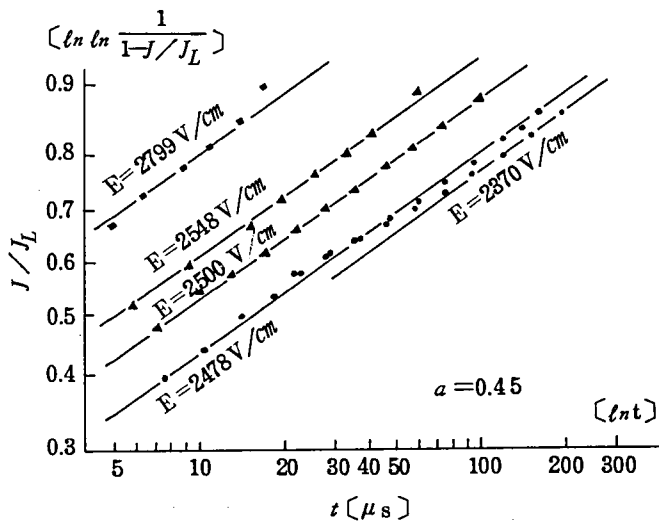
付 2-2 図の時間遅れの部分に着目して、ステップ電界  $E$  を印加した場合、時間  $t(\mu s)$  における過度電流密度を  $J$  とすると、 $J/J_L \leq 1$  であり、時間の経過に従って  $J = J_L$  となる。 $J/J_L < 1$  すなわち時間遅れの範囲について、 $J/J_L$  と  $t$  の関係を調べると付 2-6 図のように  $\ln \ln \left( \frac{1}{1-J/J_L} \right)$  と  $\ln t$  の関係は直線になるので

$$\frac{J(E, t)}{J_L(E)} = 1 - \exp \{ -f(E) t^a \} \quad (3)$$

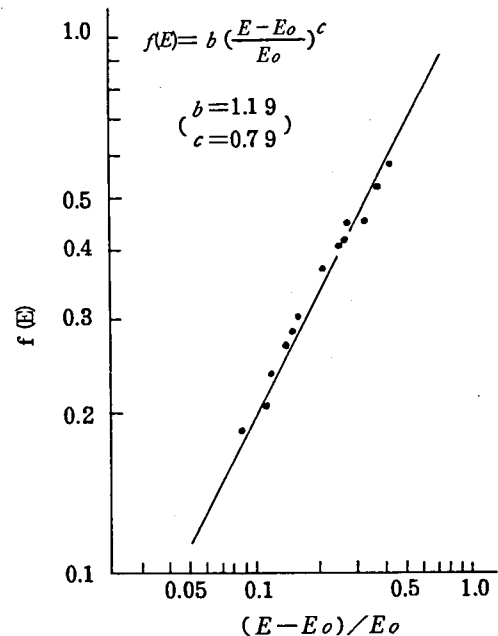
となる。ここに  $a$  は定数であり、 $f(E)$  は  $t = 1 \mu s$  における  $\ln \frac{1}{1-J/J_L}$  で与えられるが、さらに付 2-7 図に示す関係があるので、次式となる。

$$f(E) = b \left( \frac{E - E_o}{E_o} \right)^c \quad (4)$$

ここに、 $b$  と  $c$  は定数である。



付 2-6 図  $J/J_L$  と  $t$  との関係



付 2-7 図  $f(E)$  の特性

以上のとおり、ZnO 素子の場合には、時間効果を考慮すると、E-J 特性に従って電圧-電流特性は、 $E_o$ 、 $K_o$ 、 $m$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  の 6 個の定数を用いて表現されることとなる。

## 6. 定数 $E_o$ 、 $K_o$ 、 $m$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ の数値の求め方

$E_o$  等の定数の具体的数値は上に述べた E-J 特性式の求め方と同様の方法によって求

めることができる。

- (1) まず、与えられた ZnO 素子に対し直流を印加し多数の  $E - J_L$  関係の実験値を求め付 2-5 図に示したように、それらのプロット点から、これを満足する曲線を描き、縦軸との交点  $E_o$  および(2)式より  $K_o$ 、 $m$ を求める。
- (2) ステップ電圧を加え付 2-6 図に相当する  $J/J_L$  と  $t$  の関係直線を見出し、これより  $a$ 、付 2-7 図に相当する直線から  $b$  および  $c$  を得る。

以上の方法により、UHV 用として開発された ZnO 素子の定数を求めると、

$K_o = 0.31$ 、 $E_o = 2111$ 、 $m = 2.29$ 、 $a = 0.81$ 、 $b = 0.34$ 、 $c = 0.99$  となる。

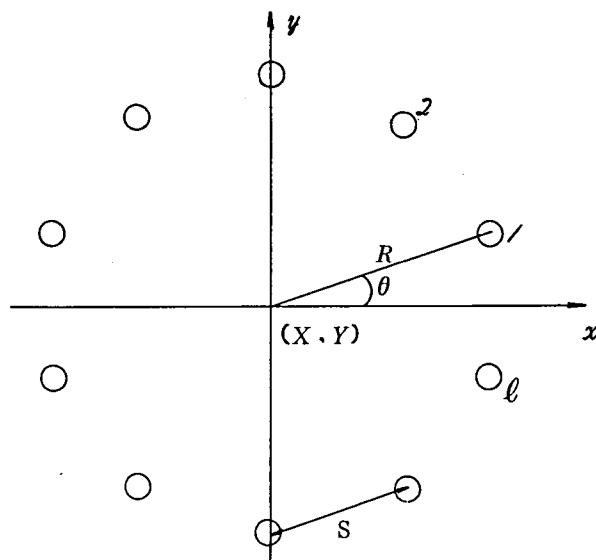
### 付録 3 UHV送電線のサージインピーダンスについて

UHV送電線では4.1表および第4.2図に示すように、相導体はACSR 950 mm<sup>2</sup> × 10のような大きな多導体からなり、鉄塔には上部の架空地線のみならず下部にも多数のしゃへい線が設けられる。本論文に用いたサージインピーダンスはこれらの点を考慮したプログラムによって計算した値を使用した。以下、その計算法の概要を述べる。

#### 1. 多導体送電線における素導体の座標

付3-1図に示すように、 $\ell$  導体からなるある相導体の各素導体に1～ $\ell$ の番号をつけ、素導体間隔を $S$ (m)、等価直径 $2R$ の中心座標を $(X, Y)$ とすると任意の素導体 $i$ の座標 $(x_i, y_i)$ は(1)式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} x_i &= X + R \cos \left\{ \theta + (i-1) \frac{2\pi}{\ell} \right\} \\ y_i &= Y + R \sin \left\{ \theta + (i-1) \frac{2\pi}{\ell} \right\} \\ R &= S / 2 \sin \frac{\pi}{\ell} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



付3-1図 素導体配置

#### 2. 素導体の自己インダクタンスと相互インダクタンス

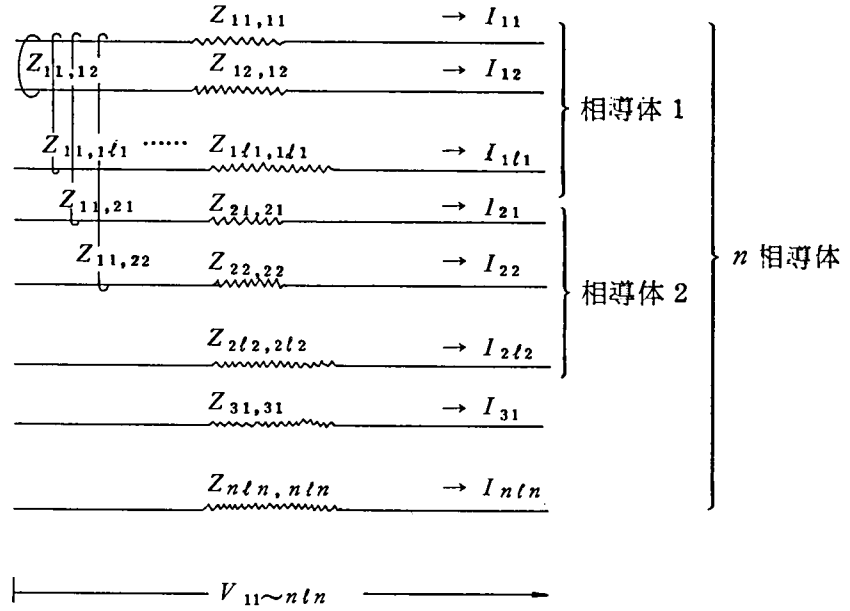
素導体の半径を $r$ (m)、相当大地面からの高さを $h$ (m)、素導体 $i$ と $j$ との距離を $S_{ij}$ (m)とすれば、自己インダクタンスおよび相互インダクタンスはそれぞれ(2)式および(3)式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} L_{ii} &= [0.1 + 0.2 \ell n(2h/r)] \times 10^{-3} \text{ (H/km)} \\ L_{jj} &= [0.1 + 0.2 \ell n(2h/r)] \times 10^{-3} \text{ (H/km)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$L_{ij} = L_{ji} = [0.05 + 0.2 \ell n(2h/S_{ij})] \times 10^{-3} \text{ (H/km)} \quad (3)$$

#### 3. 相導体の自己および相互インピーダンス

付3-2図に示すように、 $n$ 相導体からなる送電線を仮定し、その各々の素導体数を $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_n$ とすると、線路の長さ方向に誘起される電圧と電流の間には次の(4)式が成立する。



付 3-2 図  $n$  相導体送電線における電磁誘導

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ \vdots \\ I_{1l1} \\ I_{21} \\ \vdots \\ I_{nl n} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{11,11} & Z_{11,12} & \cdots & Z_{11,1l1} & Z_{11,21} & \cdots & Z_{11,nl n} \\ Z_{12,11} & Z_{12,12} & \cdots & Z_{12,1l1} & Z_{12,21} & \cdots & Z_{12,nl n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{1l1,11} & Z_{1l1,12} & \cdots & Z_{1l1,1l1} & Z_{1l1,21} & \cdots & Z_{1l1,nl n} \\ Z_{21,11} & Z_{21,12} & \cdots & Z_{21,1l1} & Z_{21,21} & \cdots & Z_{21,nl n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{nl n,11} & Z_{nl n,12} & \cdots & Z_{nl n,1l1} & Z_{nl n,21} & \cdots & Z_{nl n,nl n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{1l1} \\ V_{21} \\ \vdots \\ V_{nl n} \end{bmatrix}$$

$$= - \begin{bmatrix} Y_{11,11} & Y_{11,12} & \cdots & Y_{11,1l1} & Y_{11,21} & \cdots & Y_{11,nl n} \\ Y_{12,11} & Y_{12,12} & \cdots & Y_{12,1l1} & Y_{12,21} & \cdots & Y_{12,nl n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{1l1,11} & Y_{1l1,12} & \cdots & Y_{1l1,1l1} & Y_{1l1,21} & \cdots & Y_{1l1,nl n} \\ Y_{21,11} & Y_{21,12} & \cdots & Y_{21,1l1} & Y_{21,21} & \cdots & Y_{21,nl n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{nl n,11} & Y_{nl n,12} & \cdots & Y_{nl n,1l1} & Y_{nl n,21} & \cdots & Y_{nl n,nl n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{1l1} \\ V_{21} \\ \vdots \\ V_{nl n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)式において、同一相導体内の各素導体は同一電圧であることから、各相導体の電圧を  $V_1 (=V_{11}=V_{12}=\cdots=V_{1n})$ ,  $V_2, \cdots, V_n$  とし、また同一相導体内の素導体電流の

合計が相導体電流に等しいことから、その電流を  $I_1 (= I_{11} + I_{12} + \dots + I_{1n})$ ,  $I_2$ ,  
 $\dots$   $I_n$  とすれば(4)式は次の(5)式となる。

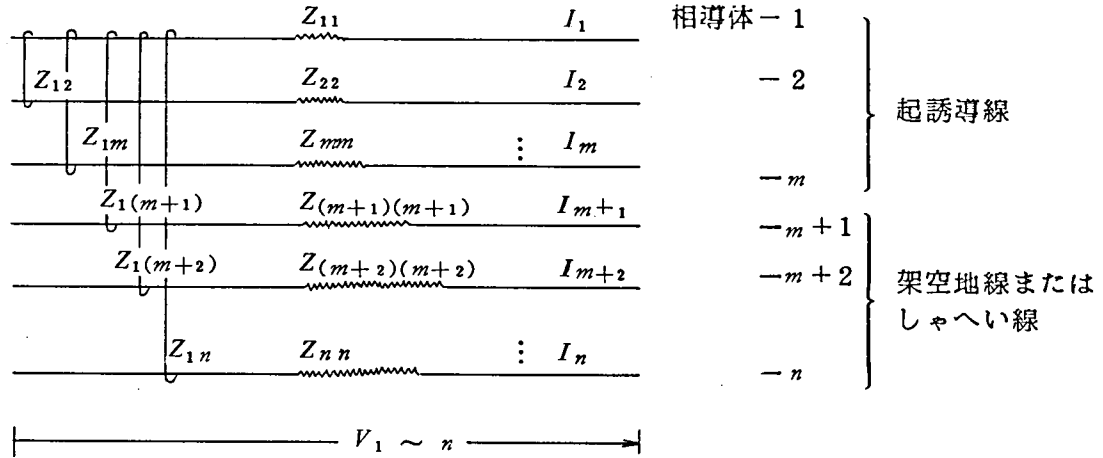
$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} Y_{11,11} + Y_{11,12} + \dots + Y_{11,1\ell 1} & Y_{11,21} + Y_{11,22} + \dots + Y_{11,2\ell 2} \\ + \dots + Y_{1\ell 1,1\ell 1} & + \dots + Y_{1\ell 1,2\ell 2} \\ Y_{21,11} + Y_{21,12} + \dots + Y_{21,1\ell 1} & Y_{21,21} + Y_{21,22} + \dots + Y_{21,2\ell 2} \\ + \dots + Y_{2\ell 2,1\ell 1} & + \dots + Y_{2\ell 2,2\ell 2} \\ \vdots & \vdots \\ Y_{n1,11} + Y_{n1,12} + \dots + Y_{n1,1\ell 1} & Y_{n1,21} + Y_{n1,22} + \dots + Y_{n1,2\ell 2} \dots \\ + \dots + Y_{n\ell n,1\ell 1} & + \dots + Y_{n\ell n,2\ell 2} \\ Y_{11,n1} + Y_{11,n2} + \dots + Y_{11,n\ell n} \\ + \dots + Y_{1\ell 1,n\ell n} \\ Y_{21,n1} + Y_{21,n2} + \dots + Y_{21,n\ell n} \\ + \dots + Y_{2\ell 2,n\ell n} \\ \vdots \\ Y_{n1,n1} + Y_{n1,n2} + \dots + Y_{n1,n\ell n} \\ + \dots + Y_{n\ell n,n\ell n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \\
 &= - \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{5}
 \end{aligned}$$

従って、相導体の自己インピーダンス  $Z_{ii}$  および相互インピーダンス  $Z_{ij}$  は(6)式を満足する。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \\
 &= - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{6}
 \end{aligned}$$

#### 4. 架空地線、しゃへい線の影響を考慮したインダクタンス

いま、付3-3図に示すように、相導体1～ $m$ を起誘導線とし、相導体 $m+1$ ～ $n$ を架空地線またはしゃへい線とすれば、(6)式において $V_{m+1}=V_{m+2}=\dots\dots=V_n=0$ とおくことにより(7)式が成立する。



付3-3図 架空地線、しゃへい線を考慮した電磁誘導

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \\ 0.0 \\ \vdots \\ 0.0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{1m} & Z_{1(m+1)} & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{2m} & Z_{2(m+1)} & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots\dots\dots Z_{mm} & \dots\dots\dots Z_{m(m+1)} & \dots\dots\dots Z_{mn} \\ Z_{(m+1)1} & Z_{(m+1)2} & \dots\dots\dots Z_{(m+1)m} & Z_{(m+1)(m+1)} & \dots\dots\dots Z_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots\dots\dots Z_{nm} & Z_{n(m+1)} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ I_{m+1} \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)式から

$$\begin{bmatrix} 0.0 \\ \vdots \\ 0.0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{(m+1)1} & Z_{(m+1)2} & \dots\dots\dots Z_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots\dots\dots Z_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{(m+1)(m+1)} & \dots\dots\dots Z_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{n(m+1)} & \dots\dots\dots Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m+1} \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

したがって

$$\begin{bmatrix} I_{m+1} \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{(m+1)(m+1)} & \dots\dots\dots Z_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{n(m+1)} & \dots\dots\dots Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{(m+1)1} & Z_{(m+1)2} & \dots\dots\dots Z_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots\dots\dots Z_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (8)$$



(8)式を(6)式に代入して整理すると

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = - \left( \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{1(m+1)} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{2(m+1)} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{m(m+1)} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix} \right. \\ \left. \begin{bmatrix} Z_{(m+1)(m+1)} & \cdots & Z_{(m+1)n} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{n(m+1)} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{(m+1)1} & Z_{(m+1)2} & \cdots & Z_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

(9)式から、架空地線およびしゃへい線の影響を考慮したインピーダンスは(10)式に示すように見かけ上減少したものとなる。

$$\begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & \cdots & Z'_{1m} \\ Z'_{21} & Z'_{22} & \cdots & Z'_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_{m1} & Z'_{m2} & \cdots & Z'_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{1(m+1)} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{2(m+1)} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{m(m+1)} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Z_{(m+1)(m+1)} & \cdots & Z_{(m+1)n} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{n(m+1)} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{(m+1)1} & Z_{(m+1)2} & \cdots & Z_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

各導体の抵抗分を無視すると、 $Z = j\omega L$  から架空地線およびしゃへい線の影響を考慮したインダクタンスは次の(11)式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} L'_{11} & L'_{12} & \cdots & L'_{1m} \\ L'_{21} & L'_{22} & \cdots & L'_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_{m1} & L'_{m2} & \cdots & L'_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1m} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \cdots & L_{mm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{1(m+1)} & \cdots & L_{1n} \\ L_{2(m+1)} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ L_{m(m+1)} & \cdots & L_{mn} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} L_{(m+1)(m+1)} & \cdots & L_{(m+1)n} \\ \vdots & & \vdots \\ L_{n(m+1)} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_{(m+1)1} & L_{(m+1)2} & \cdots & L_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

##### 5. 架空地線、しゃへい線の影響を考慮したサージインピーダンス

$C_0$ を光速とすれば、送電線のサージインピーダンス  $Z$  は  $Z = C_0 \cdot L$  であるからこの  $L$  に(11)式の  $L'_{ii}$  を用いることにより自己サージインピーダンス  $Z'_{ii}$  が、また、 $L'_{ij}$  を用いることにより相互サージインピーダンス  $Z'_{ij}$  を求めることができる。

## 6. UHV送電線のサージインピーダンス

UHV送電線の各素導体の座標は、架空地線、相導体およびしゃへい線の弛度がそれぞれ25m、25m、20m程度であるので、第4.2図および4.1表にこの弛度を考慮することにより(1)式より求めることができる。

次に、各素導体の自己インダクタンス $L_{ii}$ と相互インダクタンス $L_{ij}=L_{ji}$ は、大地を完全導体とし、 $h$ に弛度を考慮した地上高(m)、 $r$ に $950\text{mm}^{-2}$  ACSRおよび $100\text{mm}^{-2}$  AS線のそれぞれの半径20.9mm、8mmおよび $S_{ij}=1290\sin 18(j-i)\text{mm}$ を(2)式または(3)式に代入することにより求められる。

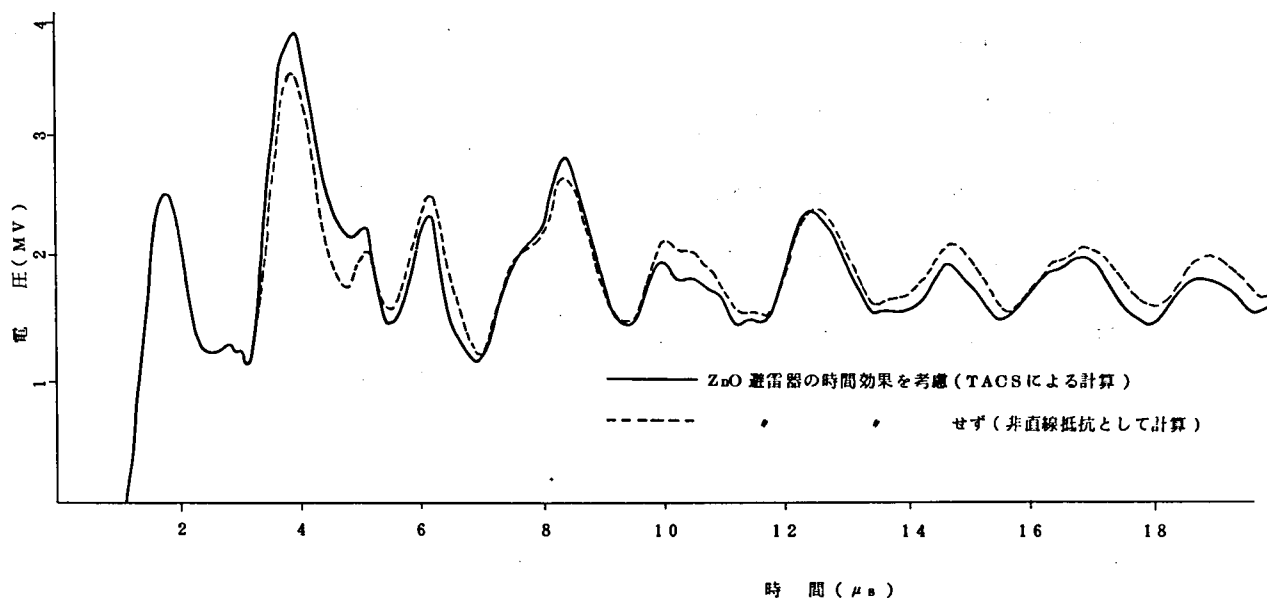
これらの $L_{ii}$ 、 $L_{ij}=L_{ji}$ を(1)式に代入することにより得られる $L'_{ii}$ 、 $L_{ij}$ の値に光速度 $3\times 10^8\text{m/sec}$ を乗ずることにより、UHV送電線の自己サージインピーダンス $Z'_{ii}$ および相互サージインピーダンス $Z'_{ij}$ を求めることができる。

# 付録 4

## 各解析ケースにおける電位波形、電流波形 および各節点の電圧ピーク一覧

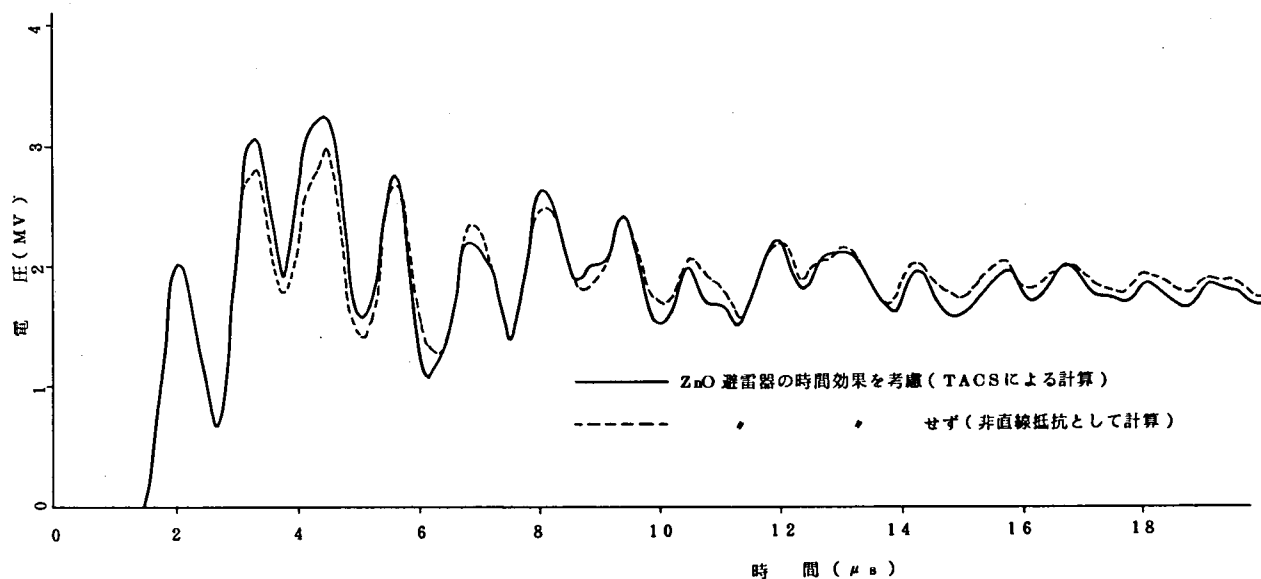
|            |                                                      |          |
|------------|------------------------------------------------------|----------|
| 付 4 - 1 図  | ケースⅡ <sub>1</sub>                                    | 代表的節点の波形 |
| 付 4 - 2 図  | ケースⅢ <sub>1</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 3 図  | ケースⅣ <sub>1</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 4 図  | ケースⅤ <sub>1</sub> - P <sub>15</sub>                  | 〃        |
| 付 4 - 5 図  | ケースⅤ <sub>1</sub> - P <sub>12</sub>                  | 電圧ピーク一覧図 |
| 付 4 - 6 図  | ケースⅤ <sub>1</sub> - P <sub>10</sub>                  | 〃        |
| 付 4 - 7 図  | ケースⅤ <sub>1</sub> - P <sub>7</sub>                   | 〃        |
| 付 4 - 8 図  | ケースⅤ <sub>1</sub> - P <sub>3</sub>                   | 代表的節点の波形 |
| 付 4 - 9 図  | ケースⅤ <sub>1</sub> - P <sub>3</sub> - P <sub>15</sub> | 〃        |
| 付 4 - 10 図 | ケースⅠ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 11 図 | ケースⅡ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 12 図 | ケースⅢ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 13 図 | ケースⅣ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 14 図 | ケースⅤ <sub>2</sub> - P <sub>15</sub>                  | 〃        |
| 付 4 - 15 図 | ケースⅤ <sub>2</sub> - P <sub>12</sub>                  | 〃        |
| 付 4 - 16 図 | ケースⅠ <sub>2</sub>                                    | 電圧ピーク一覧図 |
| 付 4 - 17 図 | ケースⅡ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 18 図 | ケースⅢ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 19 図 | ケースⅣ <sub>2</sub>                                    | 〃        |
| 付 4 - 20 図 | ケースⅤ <sub>2</sub> - P <sub>15</sub>                  | 〃        |
| 付 4 - 21 図 | ケースⅤ <sub>2</sub> - P <sub>12</sub>                  | 〃        |
| 付 4 - 22 図 | ケースⅤ <sub>2</sub> - P <sub>10</sub>                  | 〃        |

|             |                  |          |
|-------------|------------------|----------|
| 付 4 - 2 3 図 | ケース $V_2 - P_7$  | 電圧ピーク一覧図 |
| 付 4 - 2 4 図 | ケース $V_2 - P_3$  | 〃        |
| 付 4 - 2 5 図 | ケース $I'_1$       | 〃        |
| 付 4 - 2 6 図 | ケース $II'_1$      | 〃        |
| 付 4 - 2 7 図 | ケース $III'_1$     | 〃        |
| 付 4 - 2 8 図 | ケース $IV'_1$      | 〃        |
| 付 4 - 2 9 図 | ケース $V'_1 - P_3$ | 〃        |



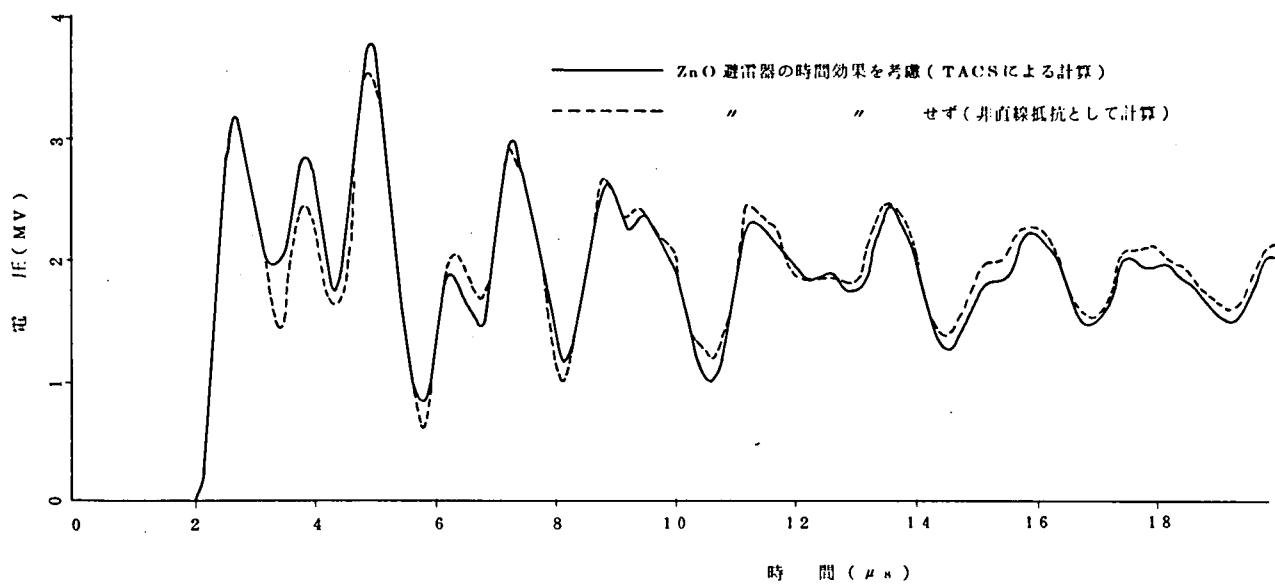
付 4-1図(a) ケース II<sub>1</sub> (変圧器端に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



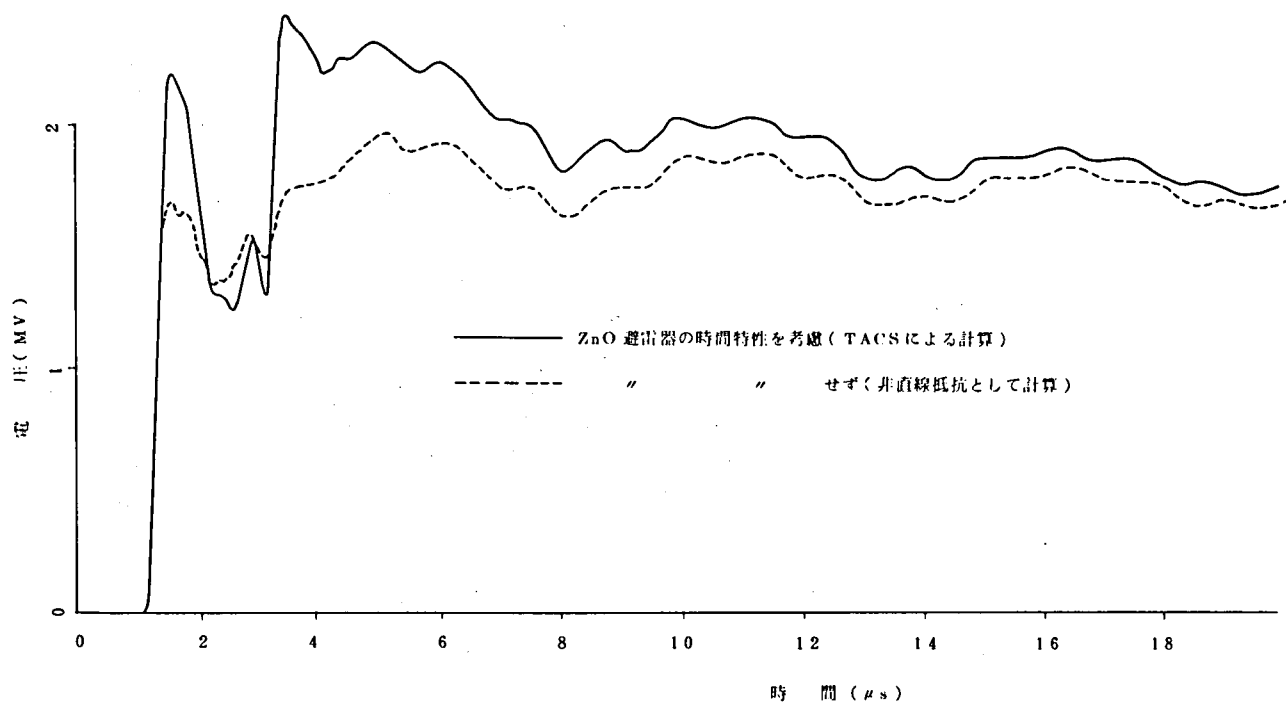
付 4-1図(b) ケース II<sub>1</sub> (変圧器端に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



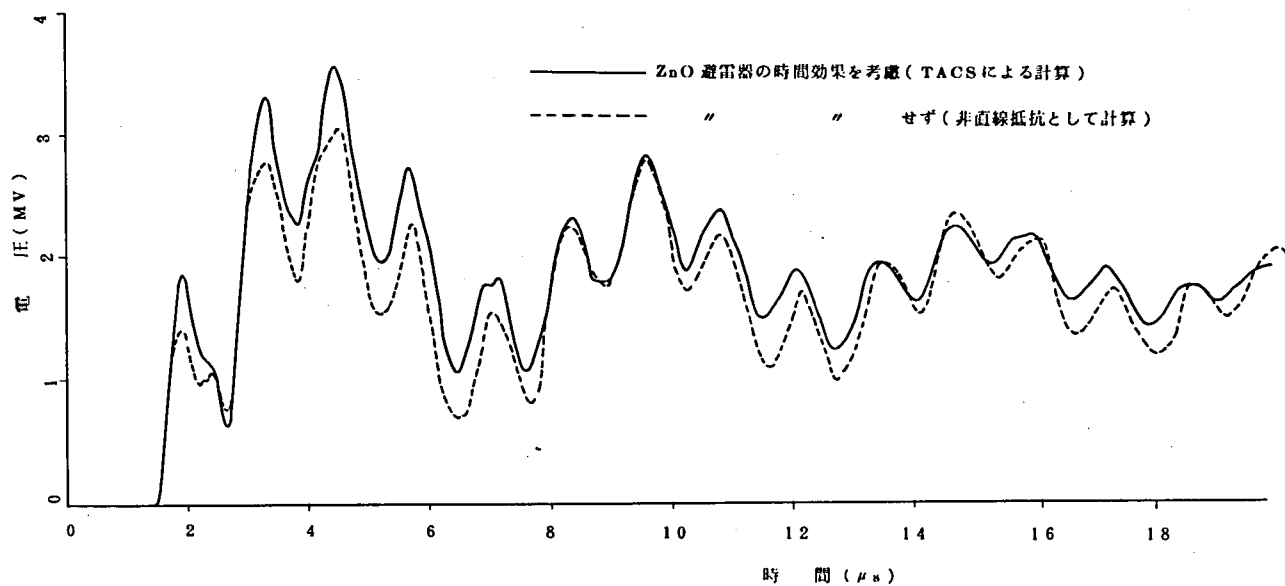
付 4 - 1 図(c) ケース II<sub>1</sub> (変圧器端に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



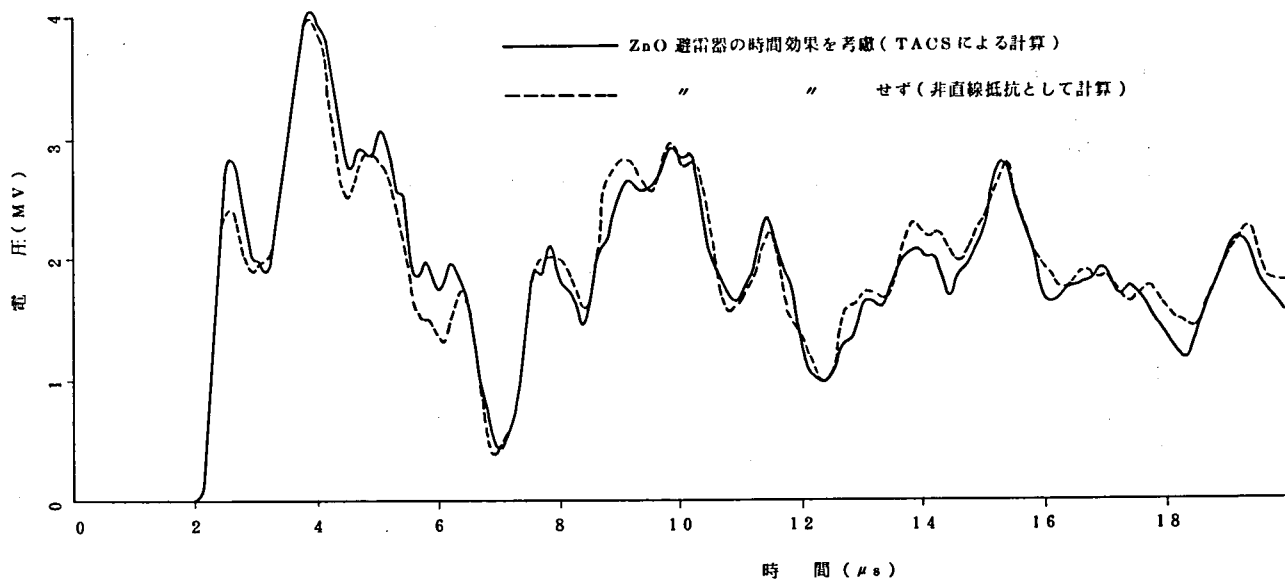
付 4 - 2 図(a) ケース III<sub>1</sub> (GIS入口に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



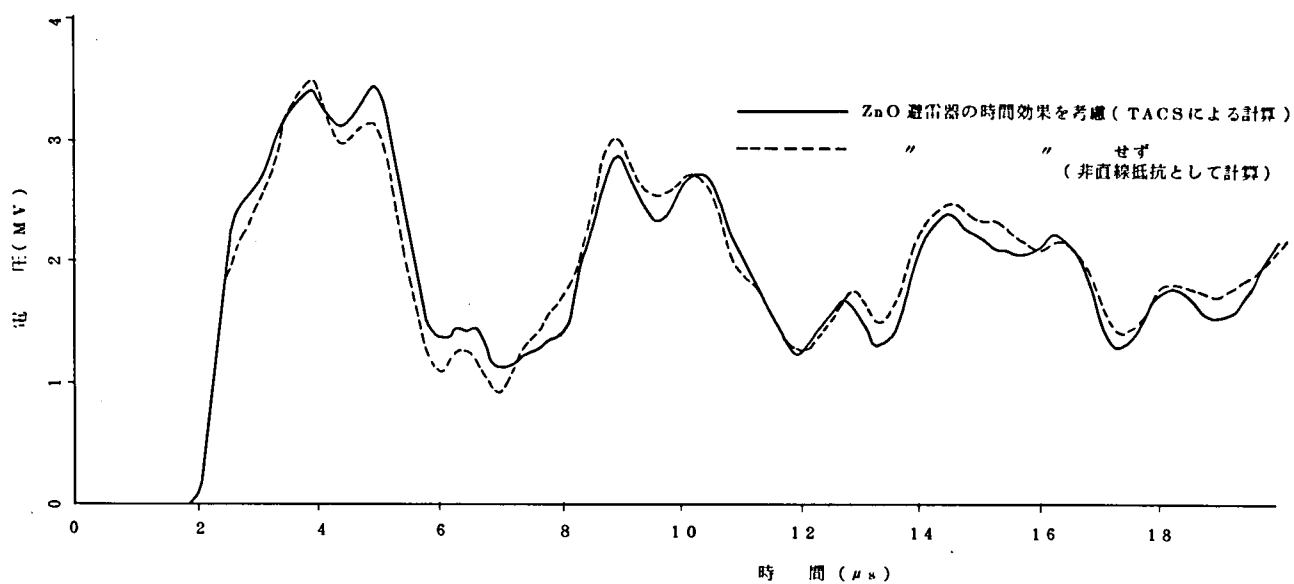
付 4 - 2 図(b) ケースⅢ<sub>1</sub> (GIS 入口に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



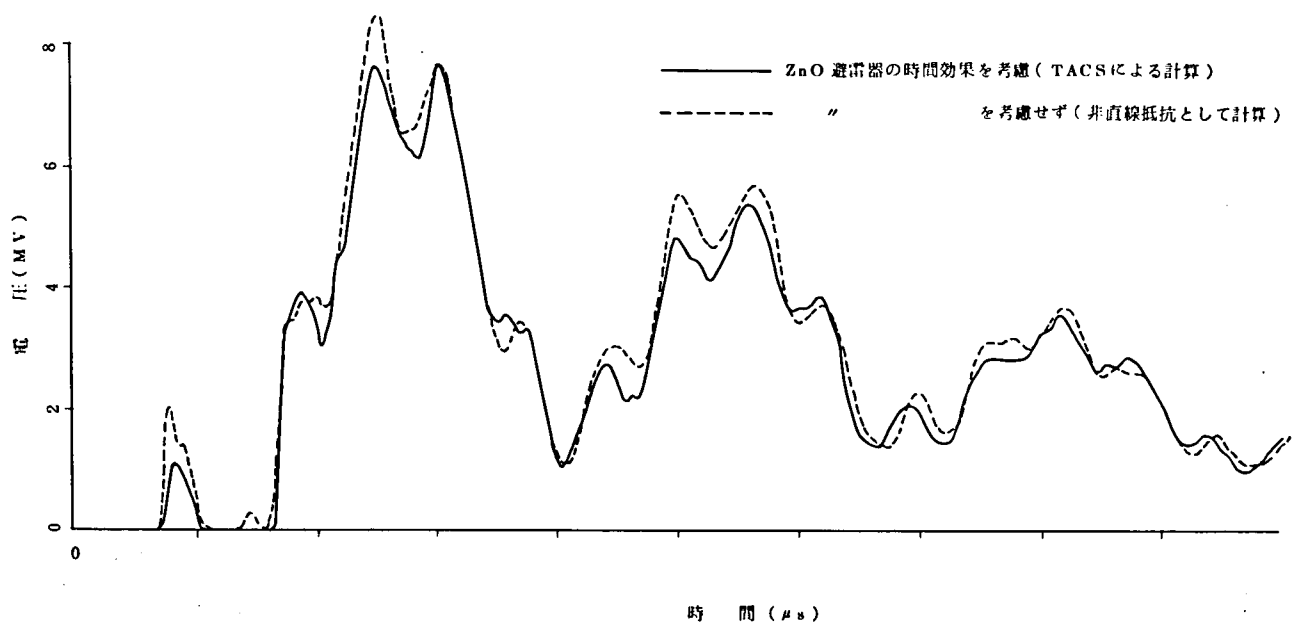
付 4 - 2 図(c) ケースⅢ<sub>1</sub> (GIS 入口に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



付4-2図(d) ケースⅢ<sub>1</sub> (GIS入口に避雷器を設置)

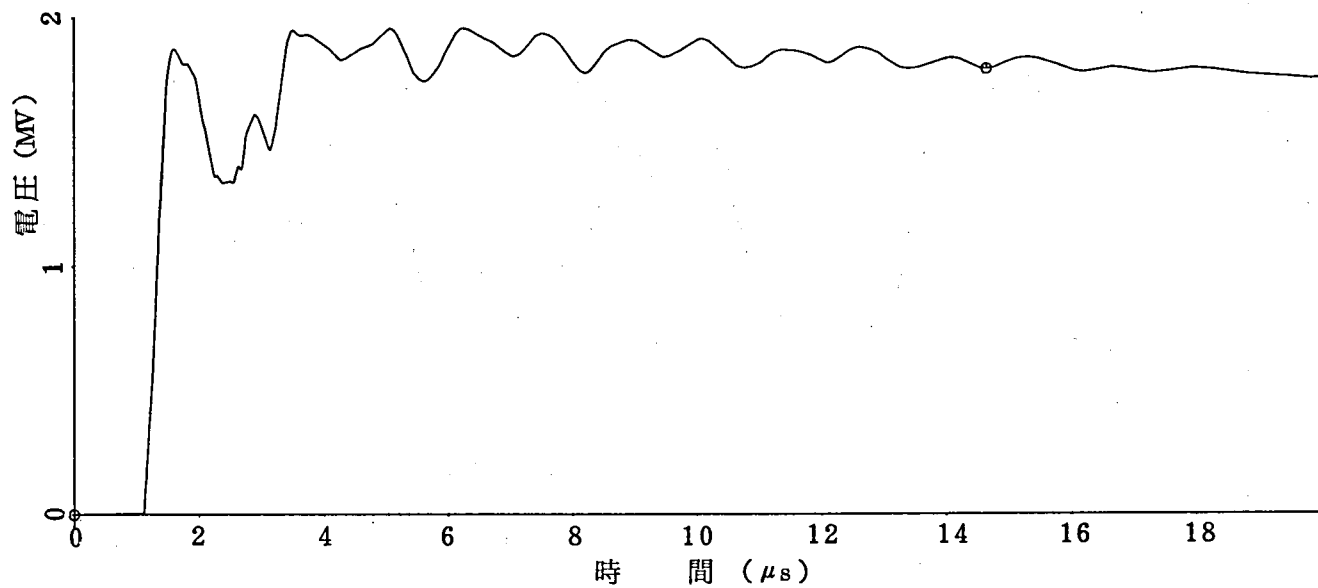
—変圧器端の電位—



付4-2図(e) ケースⅢ<sub>1</sub> (GIS入口に避雷器を設置)

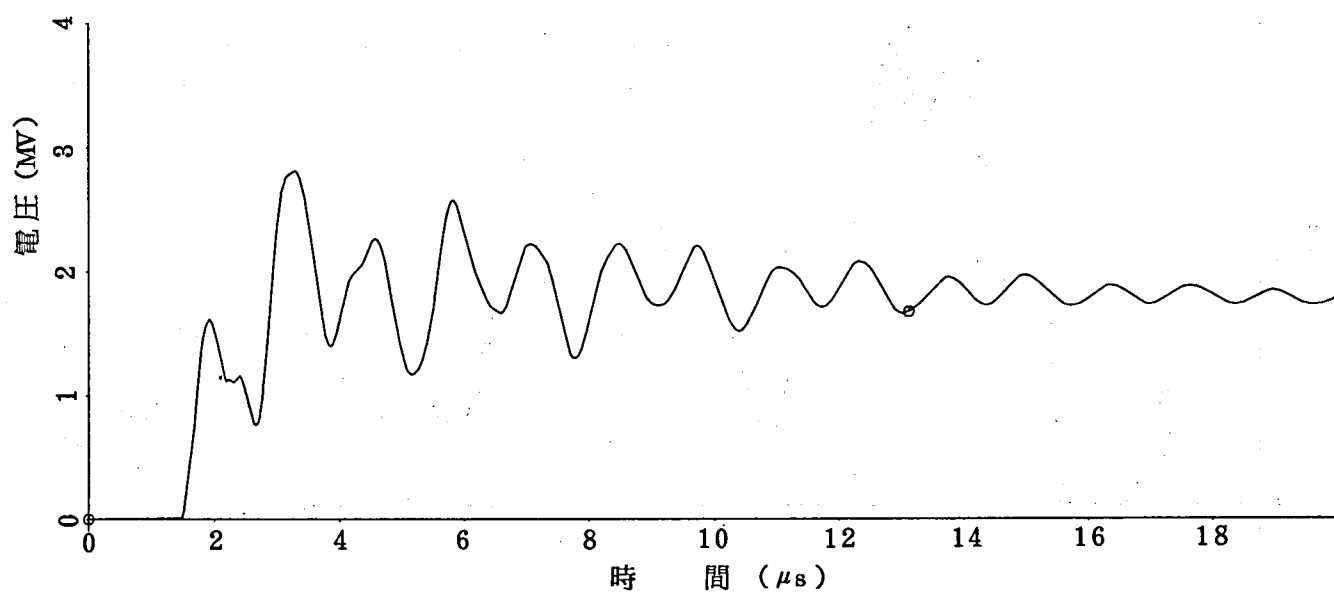
—GIS入口の避雷器に流れる電流波形—





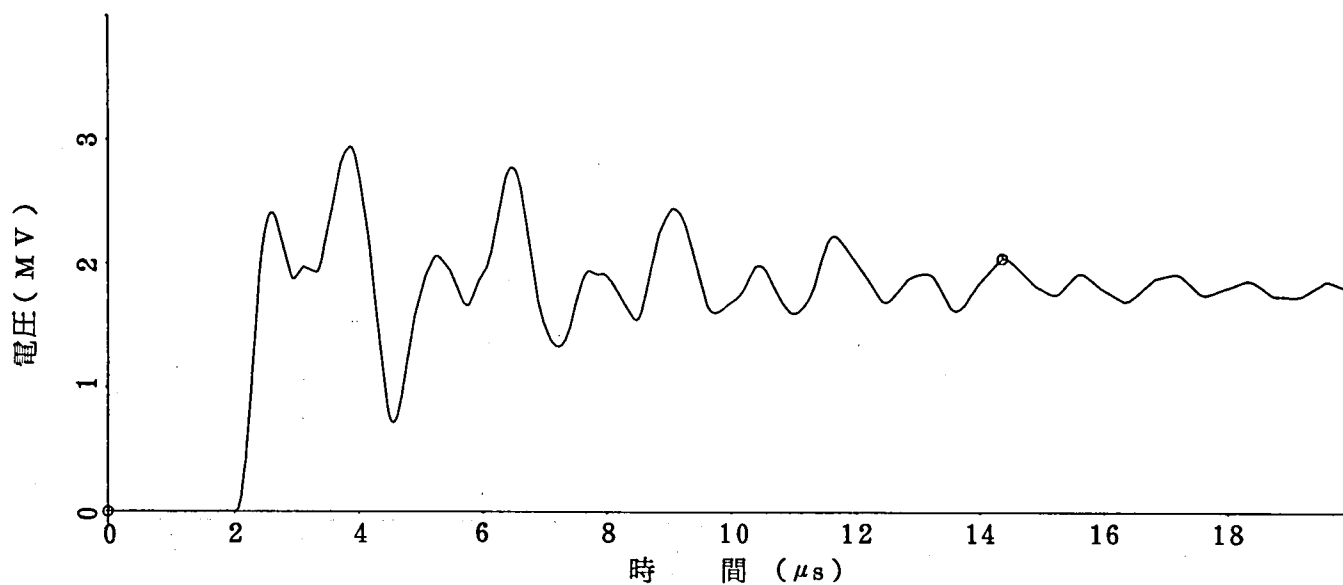
付4-3図(a) ケースⅡ<sub>1</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



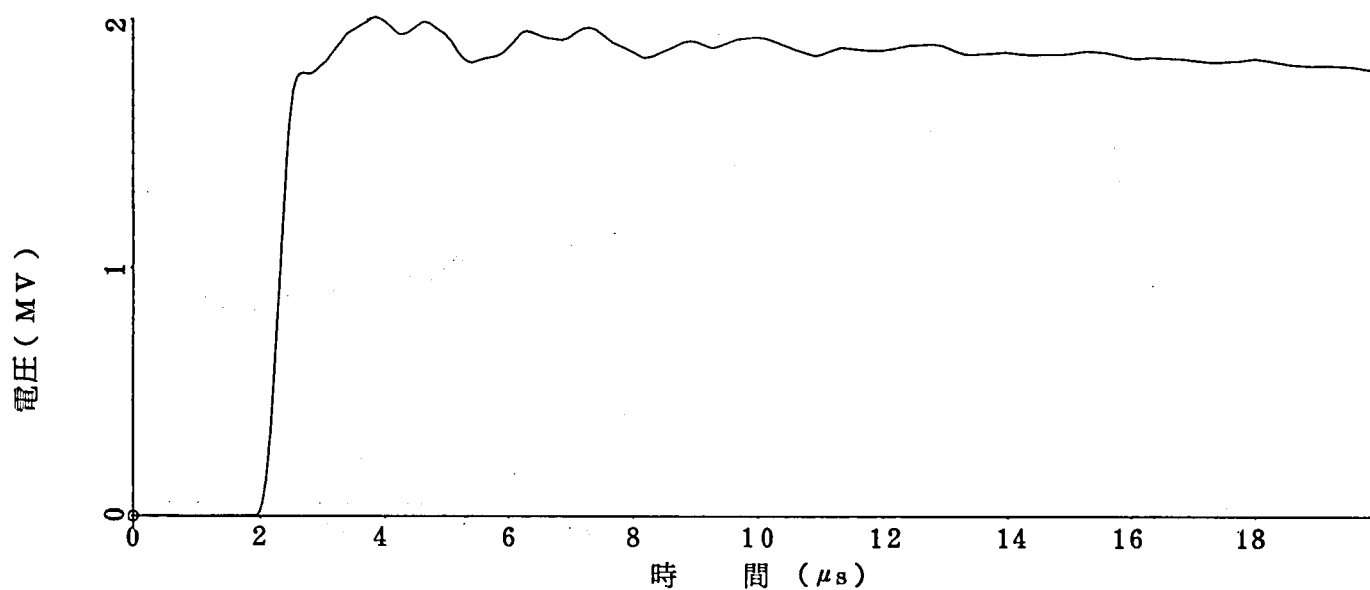
付4-3図(b) ケースⅡ<sub>1</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—線路用しゝ断器線路端の電位—



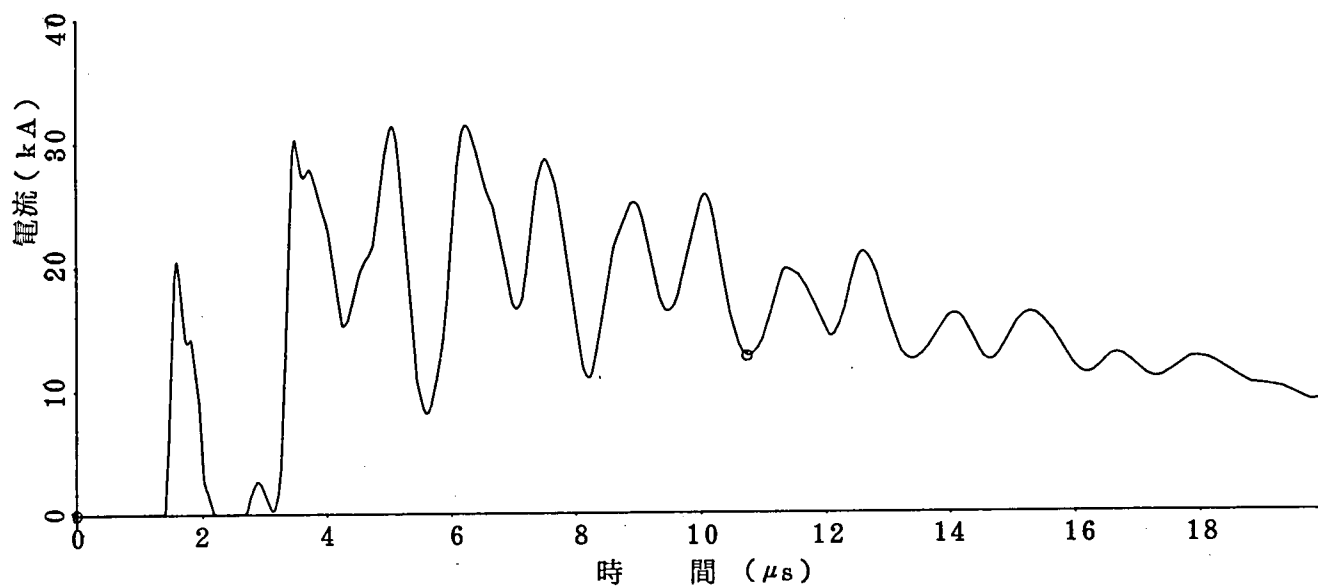
付4-3図(c) ケースⅣ<sub>1</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



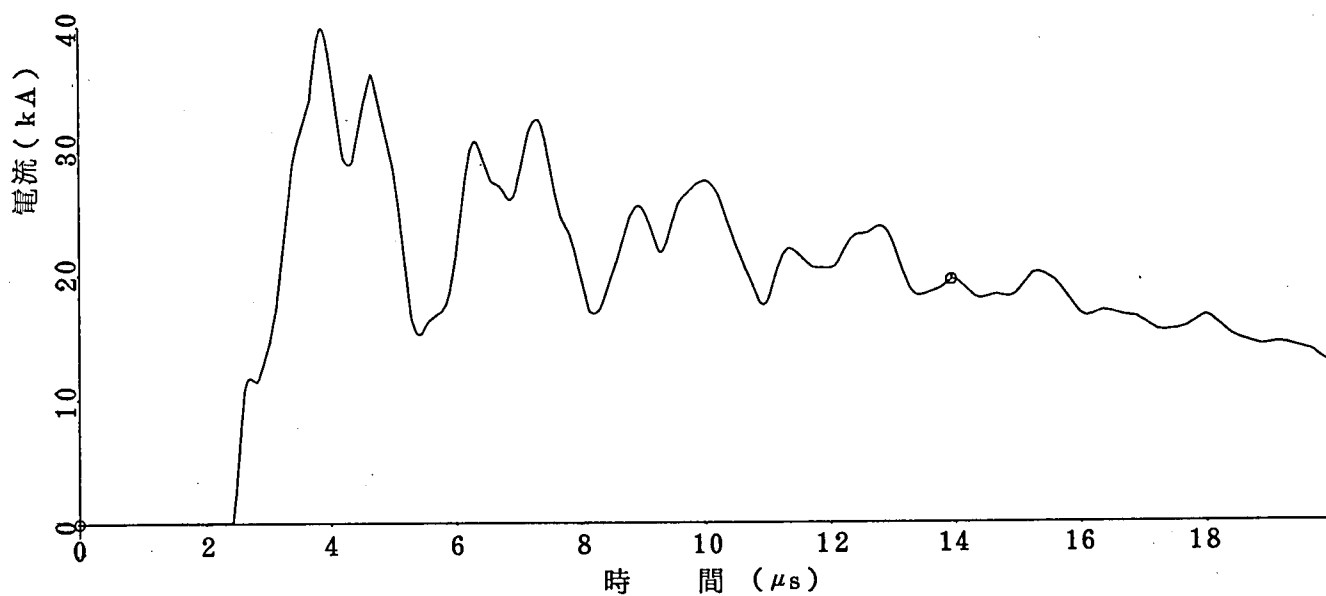
付4-3図(d) ケースⅣ<sub>1</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



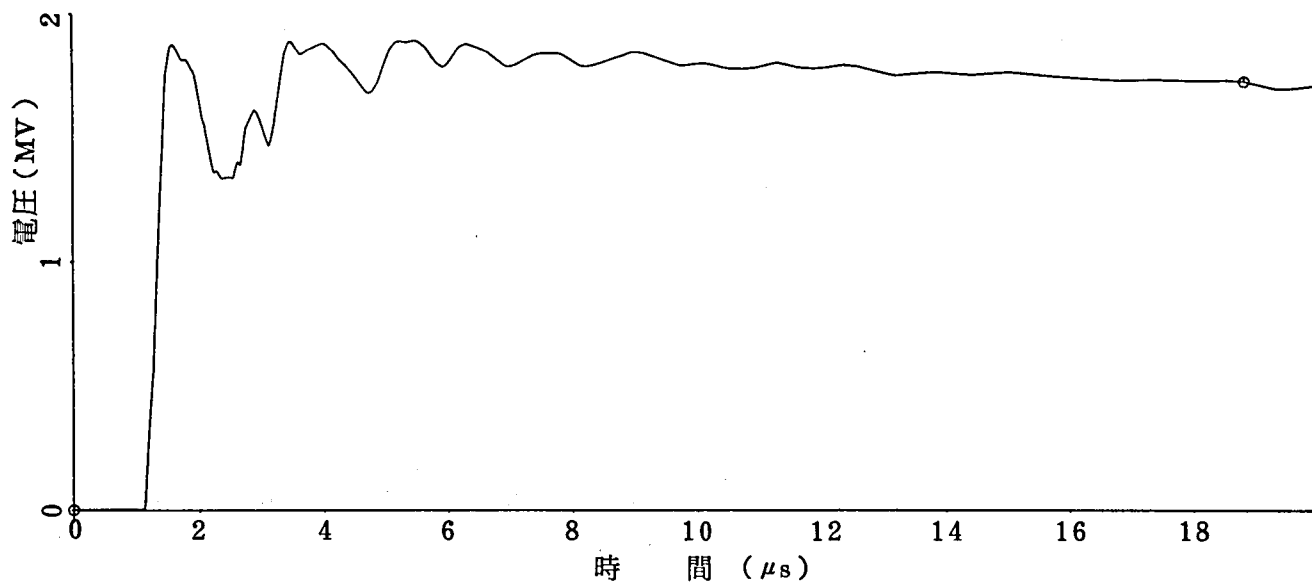
付4-3図(e) ケースⅣ<sub>1</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



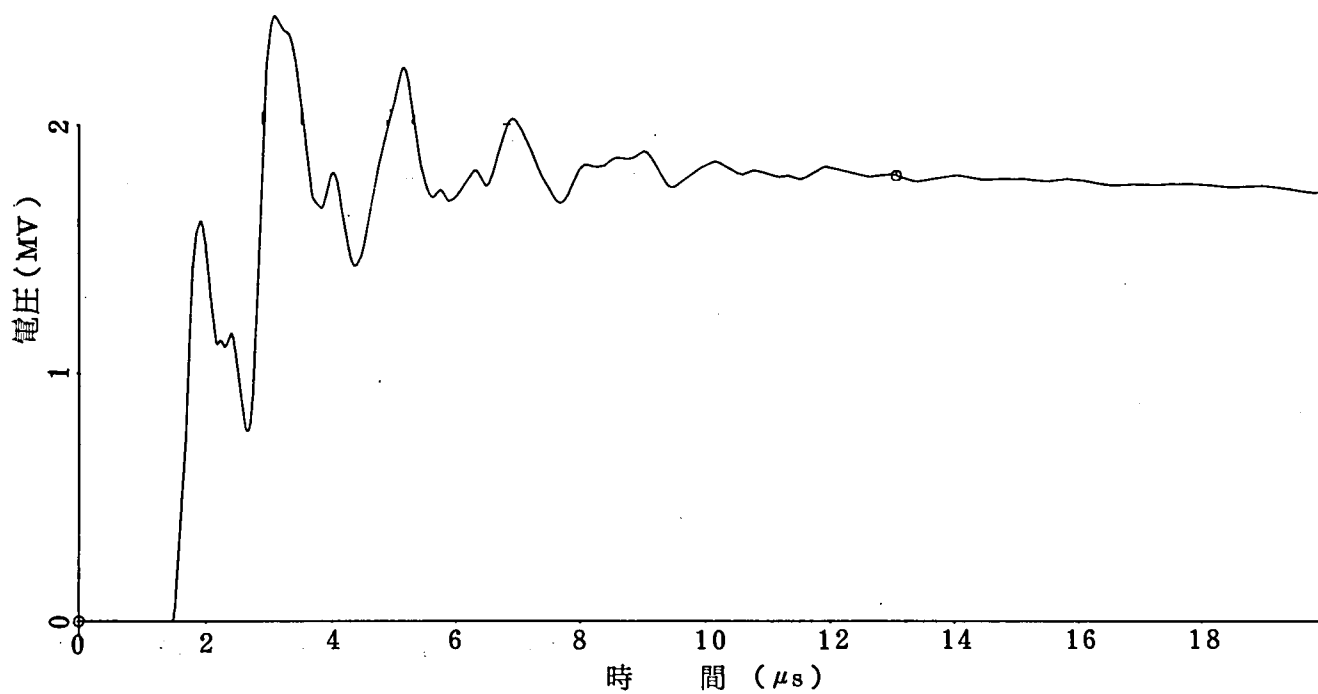
付4-3図(f) ケースⅣ<sub>1</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—



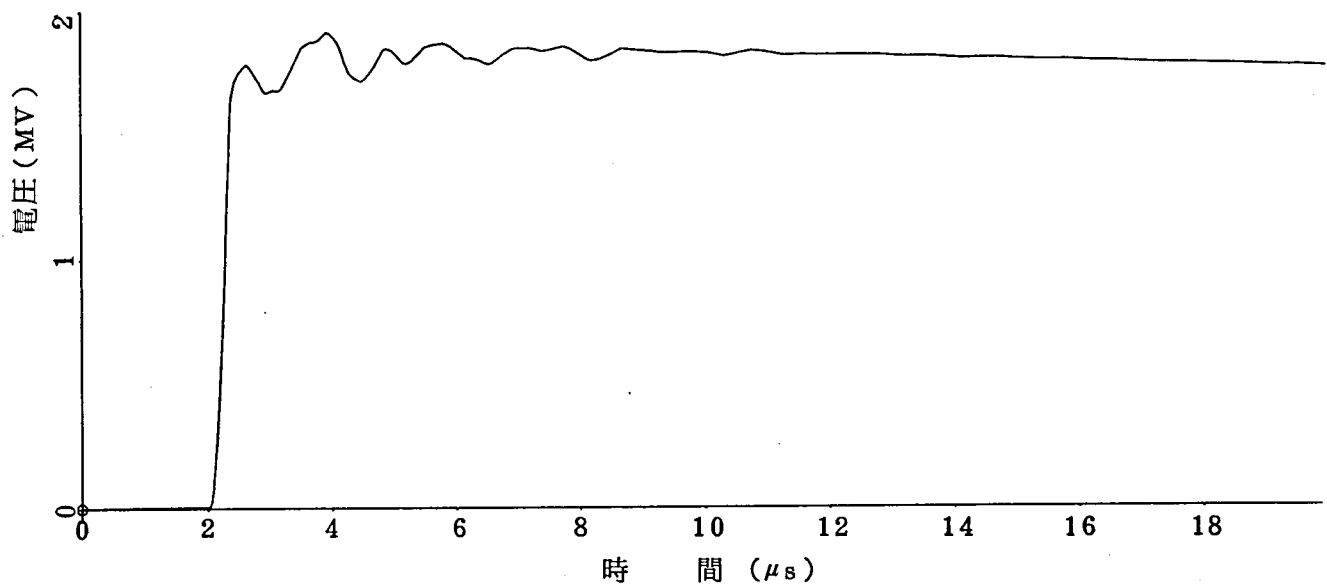
付4-4図(a) ケース  $V_1 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



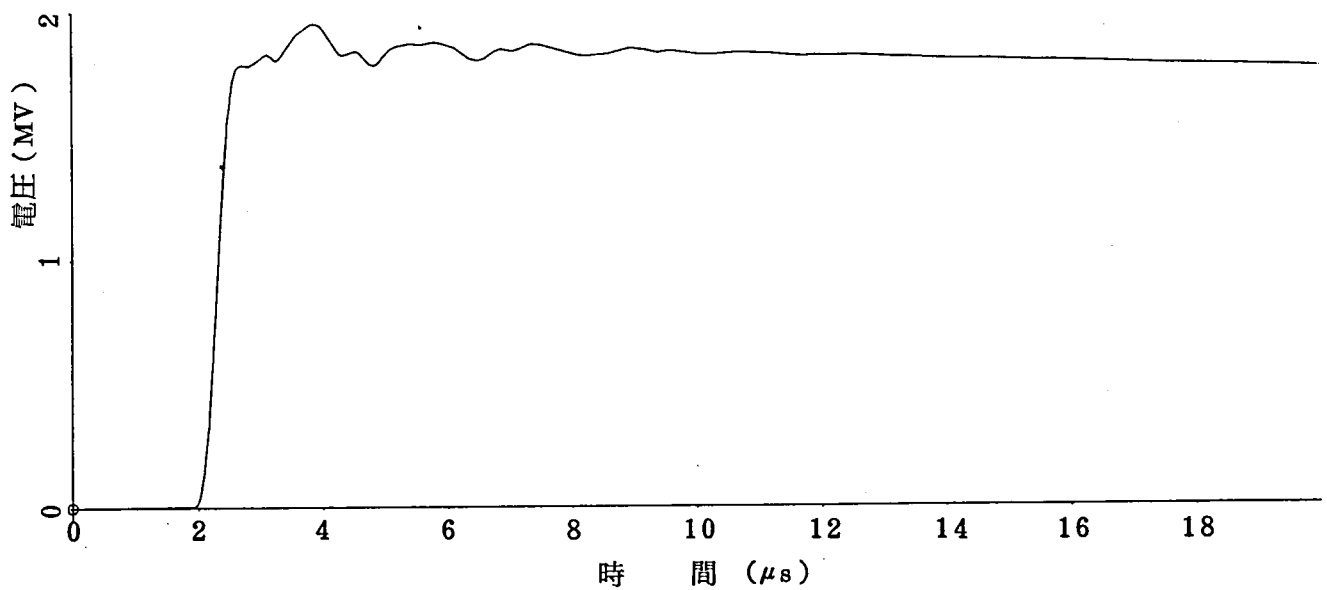
付4-4図(b) ケース  $V_1 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



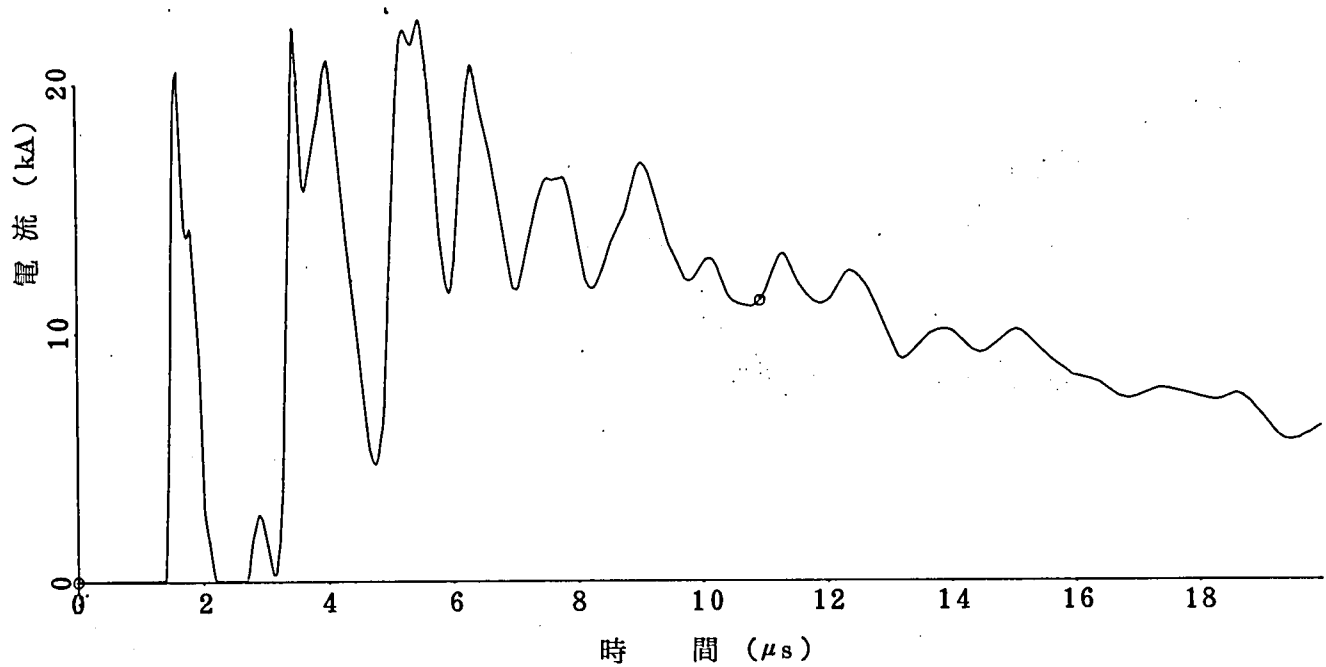
付4-4図(c) ケースV<sub>1</sub>-P<sub>15</sub> (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



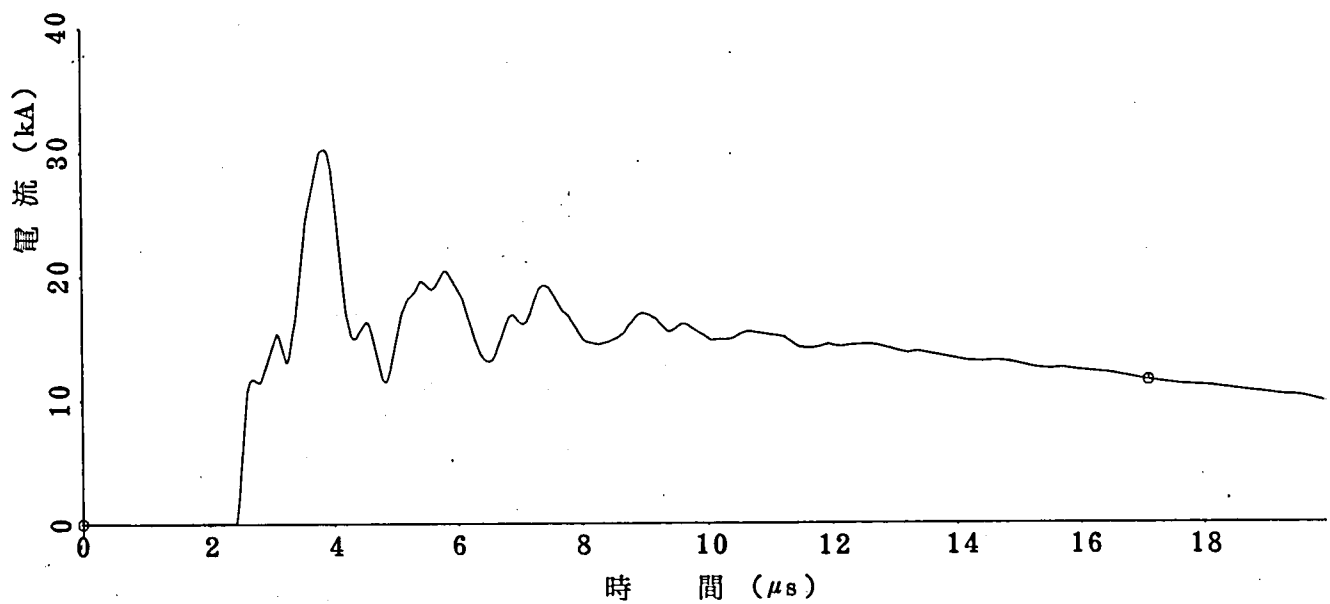
付4-4図(d) ケースV<sub>1</sub>-P<sub>15</sub> (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



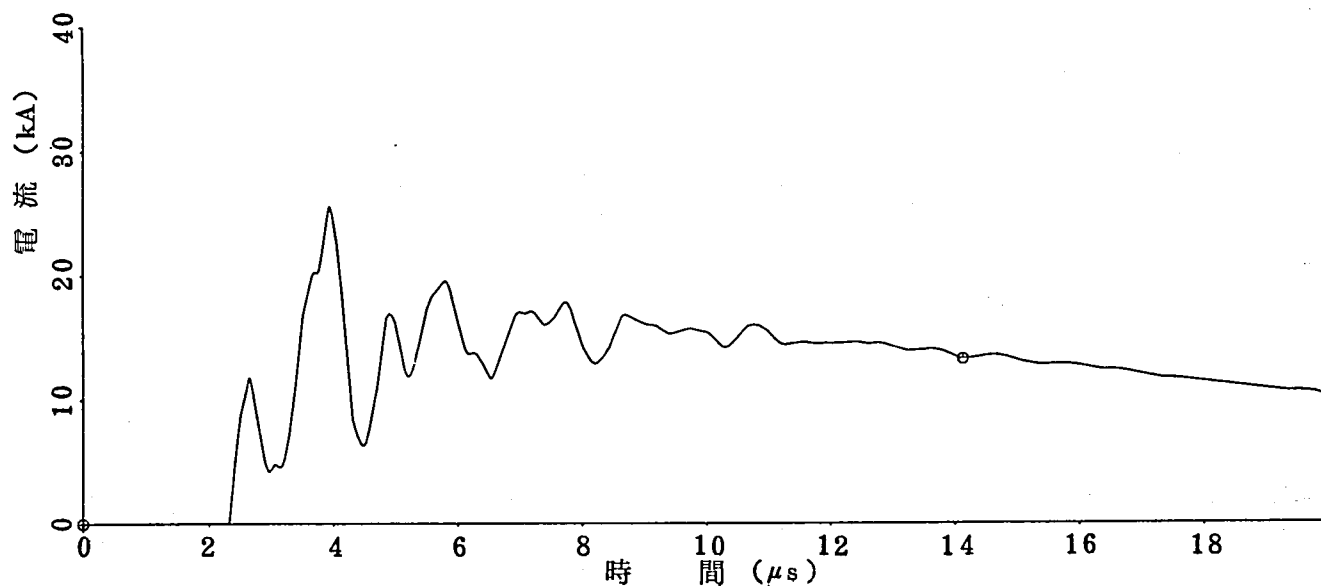
付4-4図(e) ケース  $V_1 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



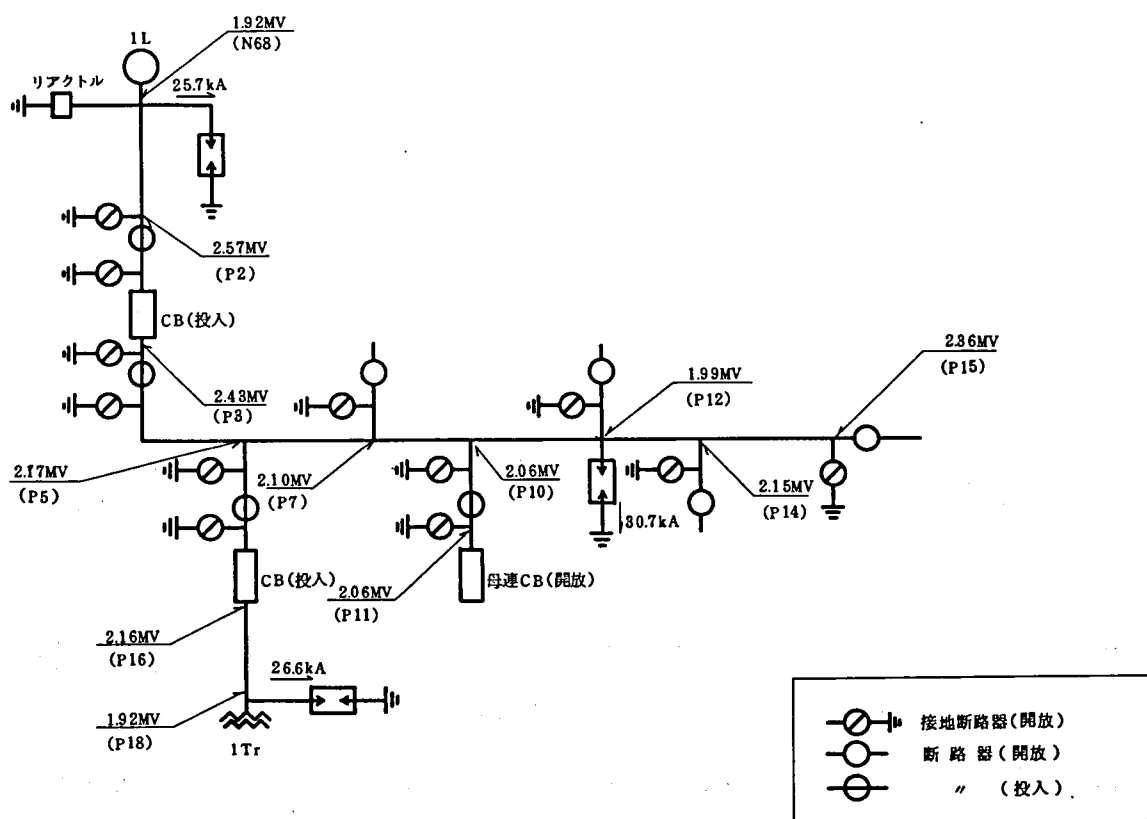
付4-4図(f) ケース  $V_1 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—

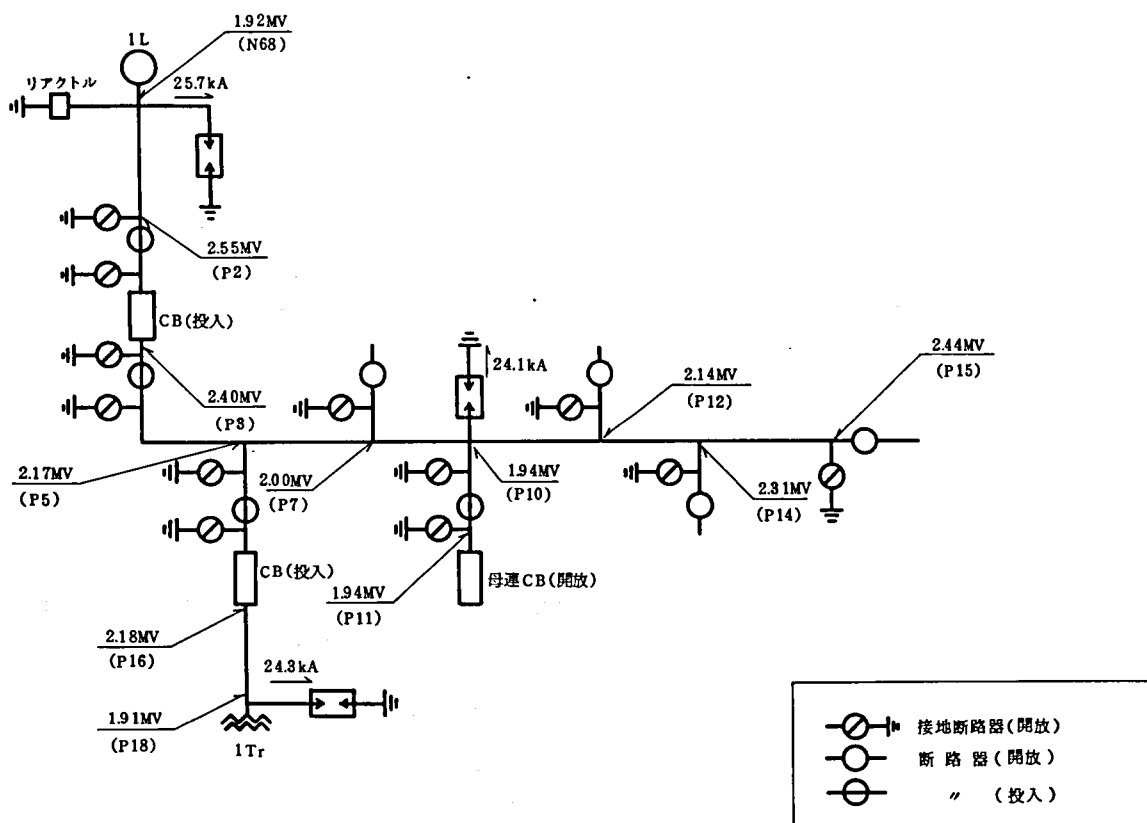


付4-4図(g) ケースV<sub>1</sub>-P<sub>15</sub> (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

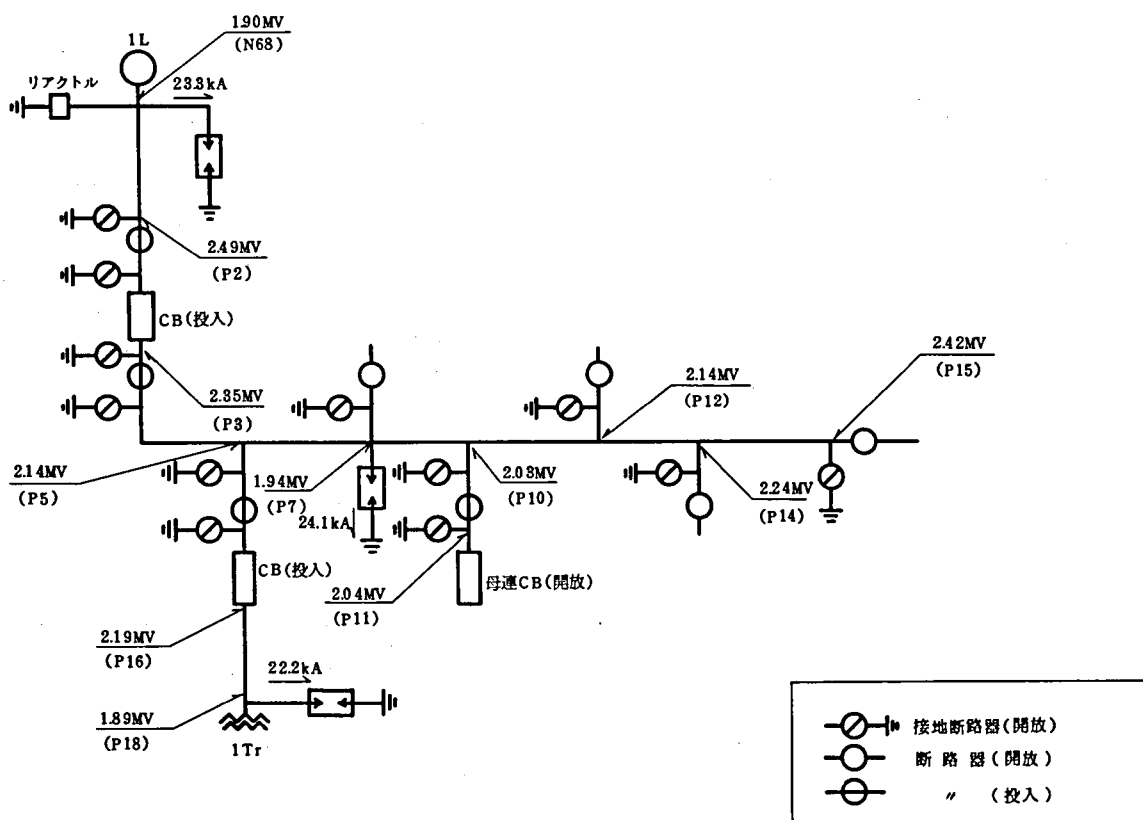
—母線P<sub>15</sub> 避雷器の電流波形—



付4-5図 電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケースV<sub>1</sub>-P<sub>12</sub>

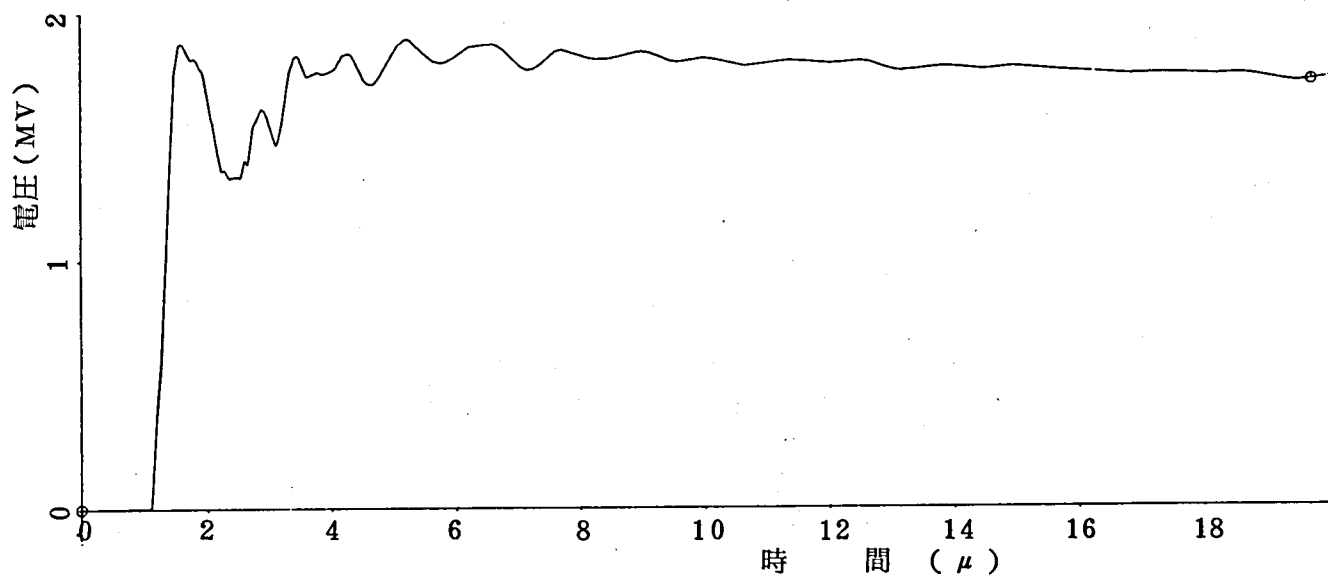


付4-6図 電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース $V_1-P_{10}$



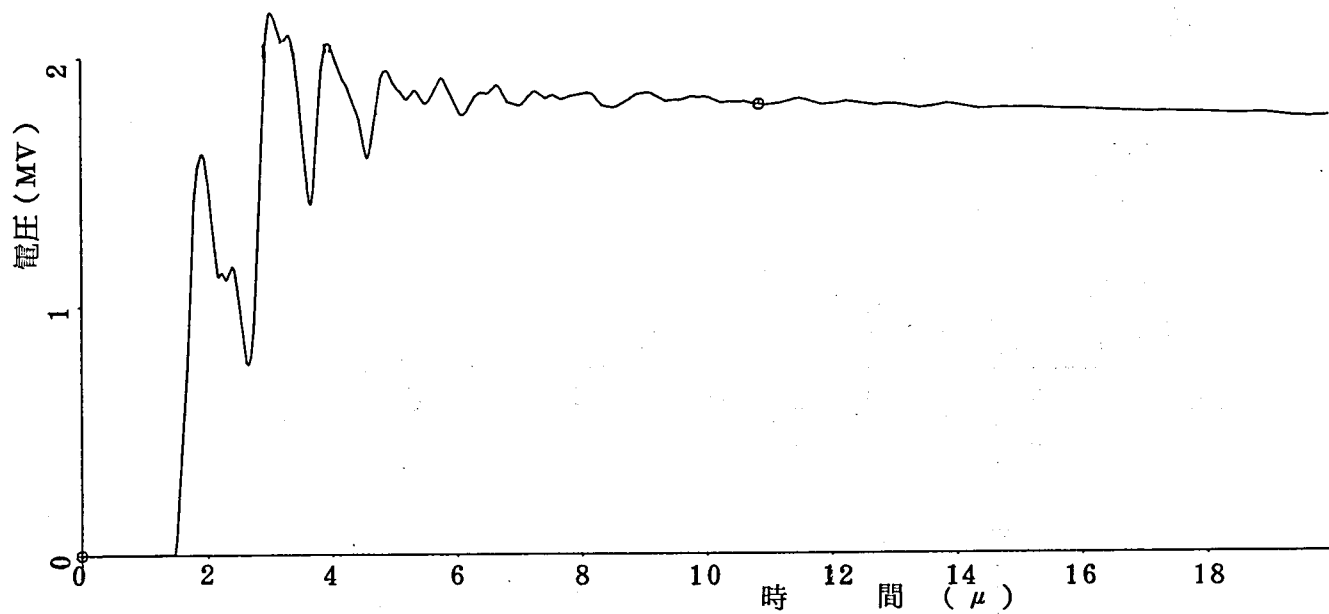
付4-7図 電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース $V_1-P_7$





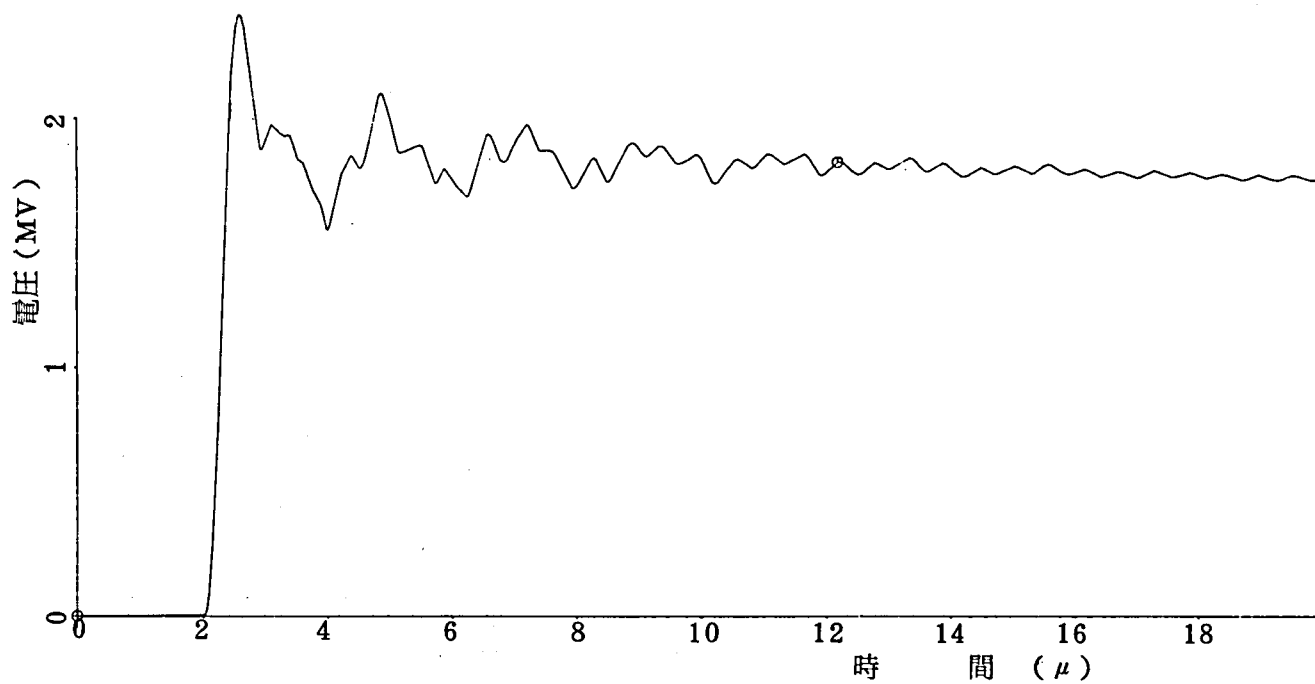
付4-8図(a) ケース $V_1 - P_3$ (GIS入口、変圧器端、母線 $P_3$ に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



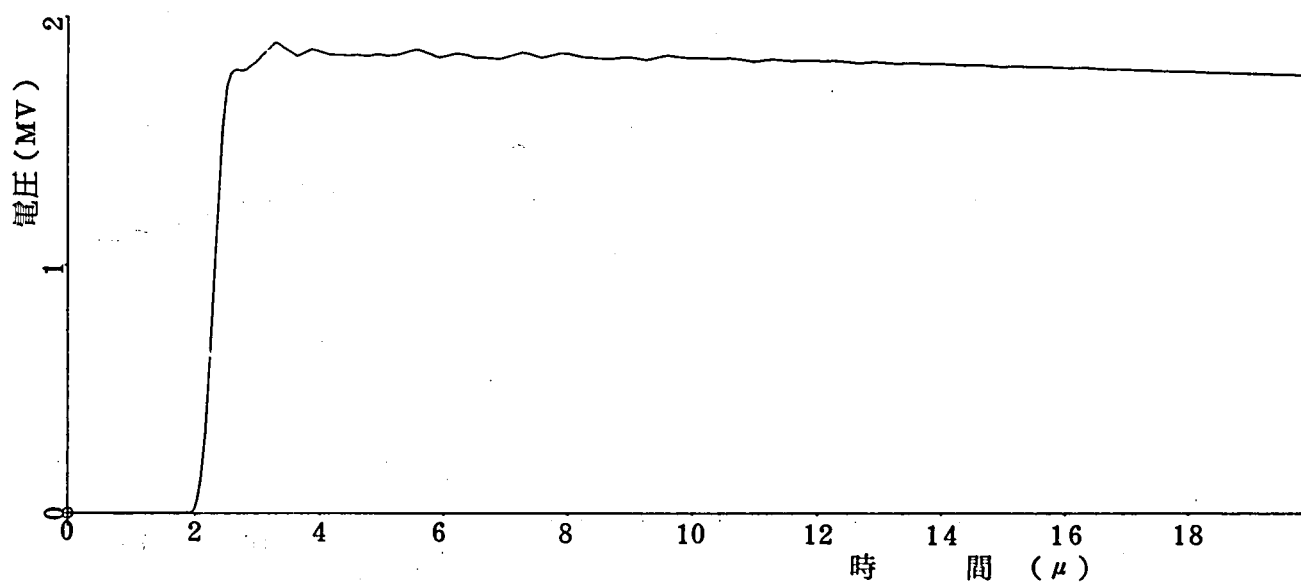
付4-8図(b) ケース $V_1 - P_3$ (GIS入口、変圧器端、母線 $P_3$ に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



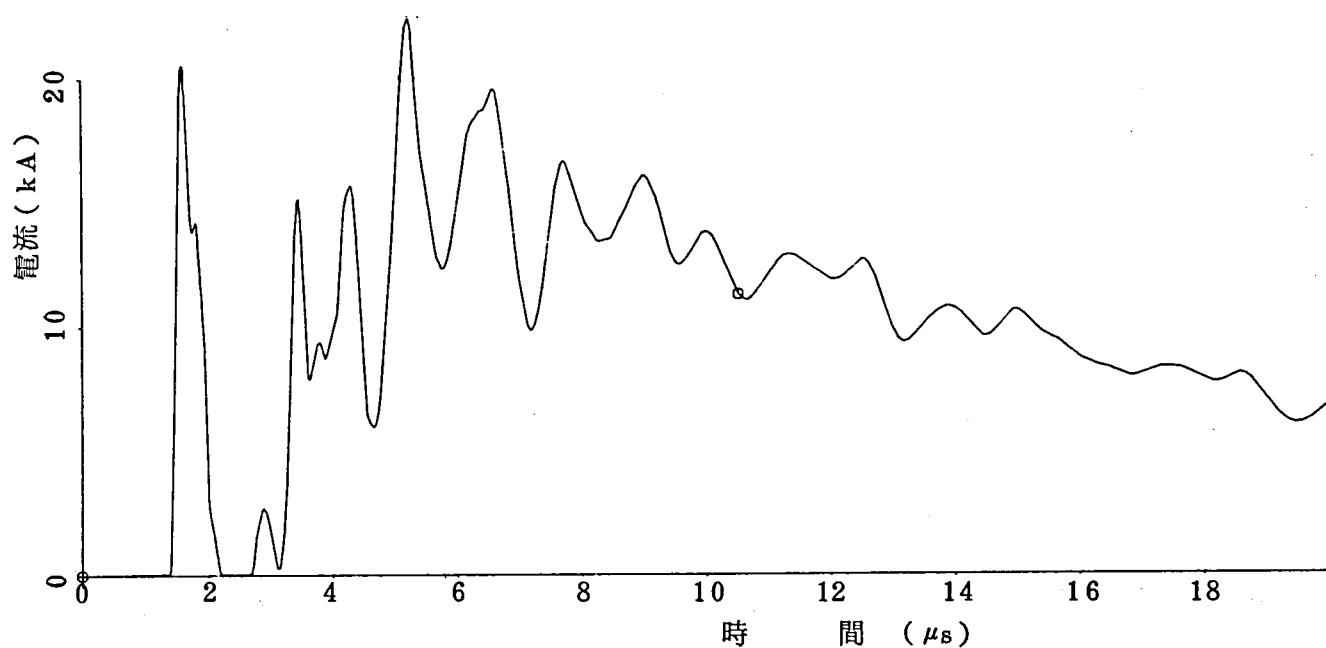
付4-8図(c) ケースV<sub>1</sub>-P<sub>3</sub>(GIS入口、変圧器端、母線P<sub>3</sub>に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



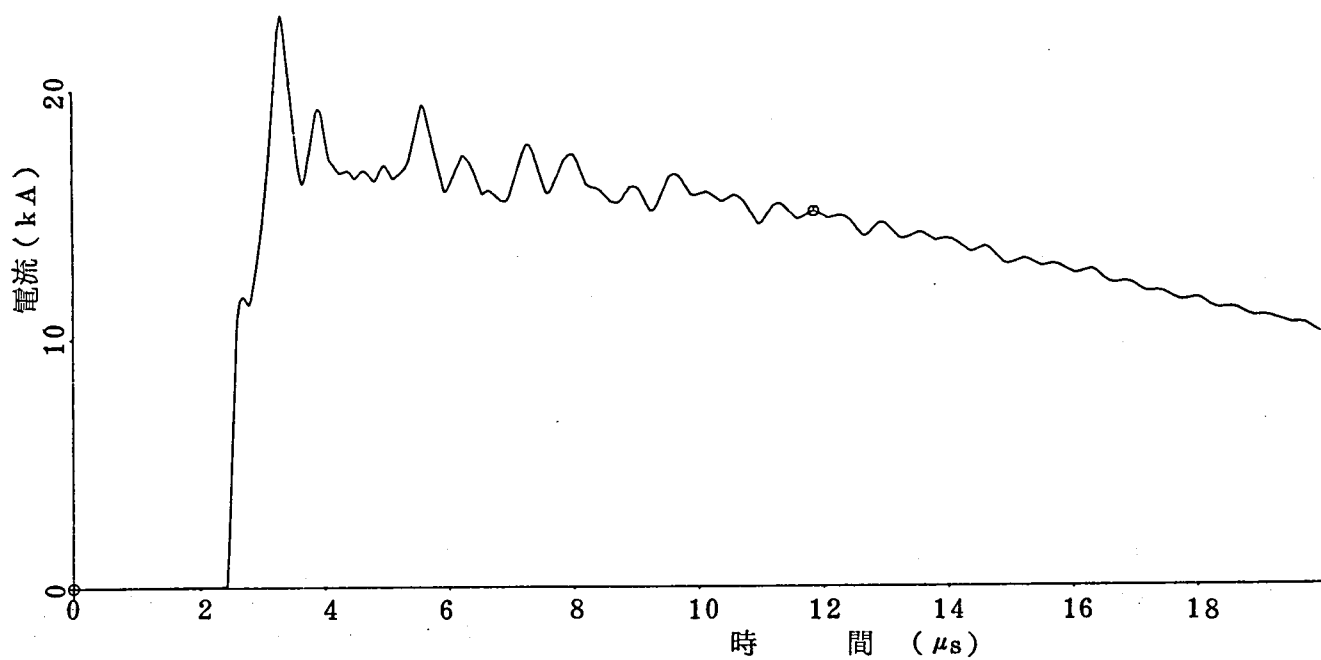
付4-8図(d) ケースV<sub>1</sub>-P<sub>3</sub>(GIS入口、変圧器端、母線P<sub>3</sub>に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



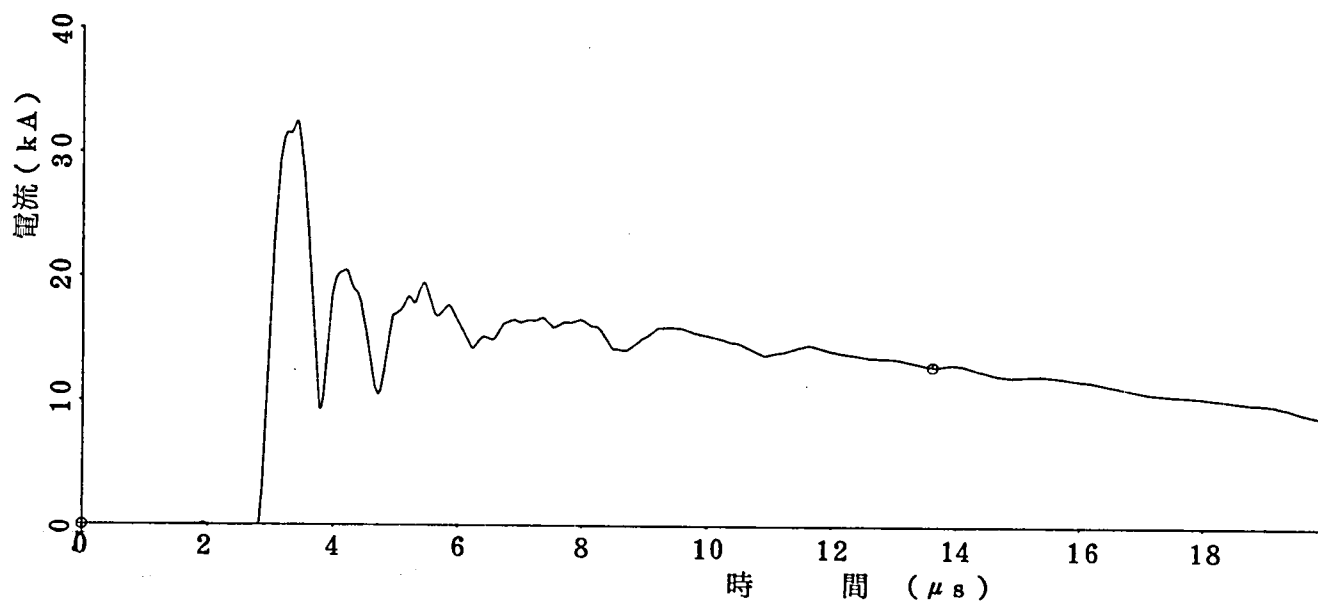
付4-8図(e) ケース  $V_1 - P_3$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$  に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



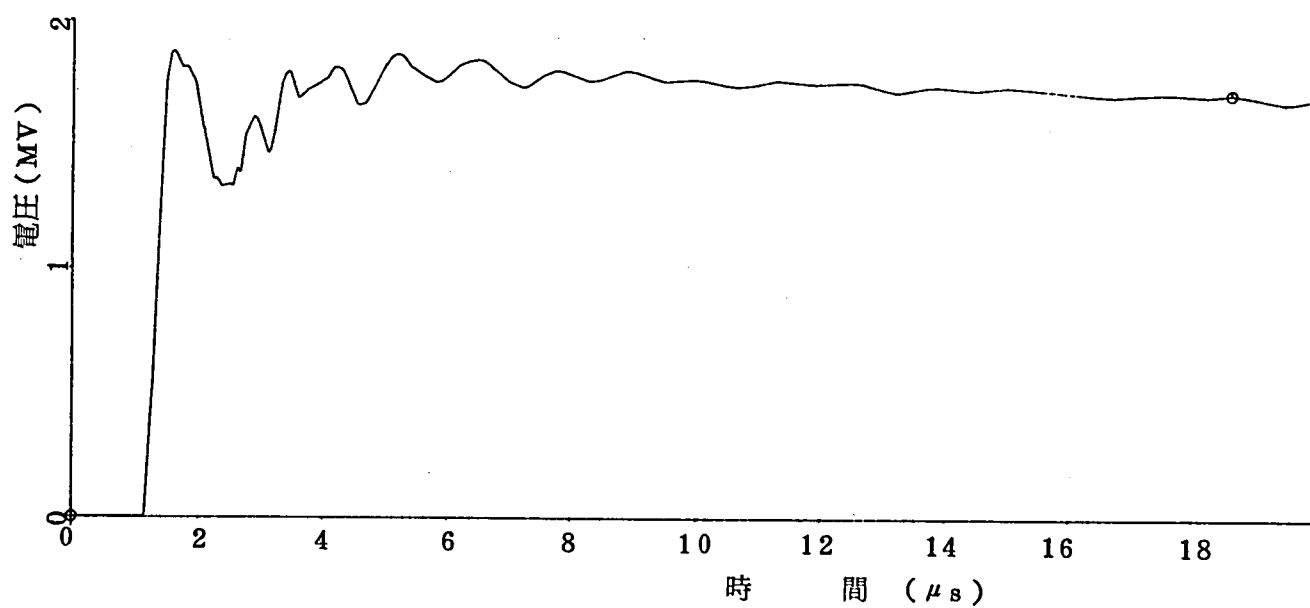
付4-8図(f) ケース  $V_1 - P_3$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$  に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—



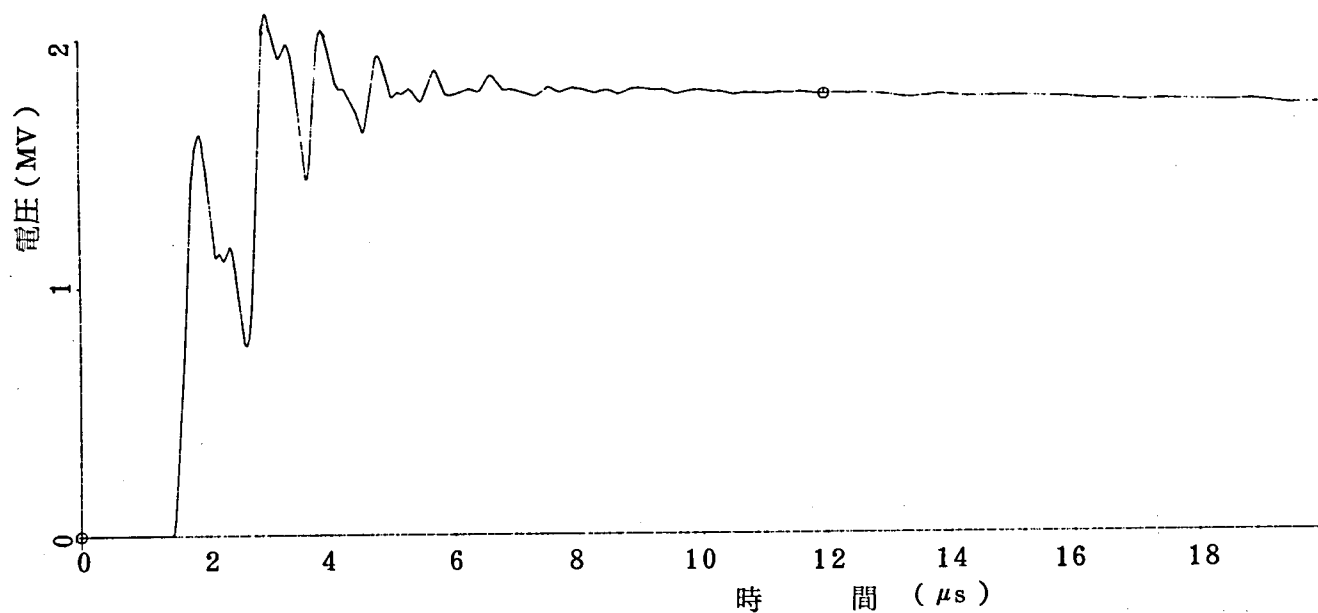
付4-8図(g) ケース  $V_1 - P_3$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$  に避雷器を設置)

—母線  $P_3$  避雷器の電流波形—



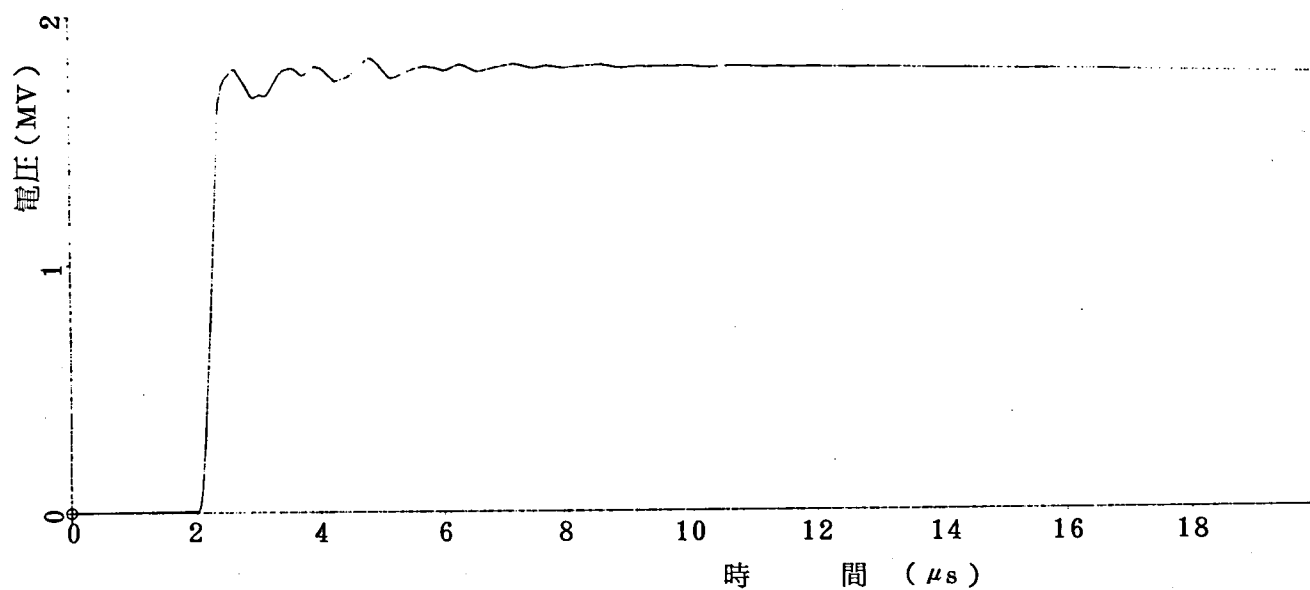
付4-9図(a) ケース  $V_1 - P_3 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



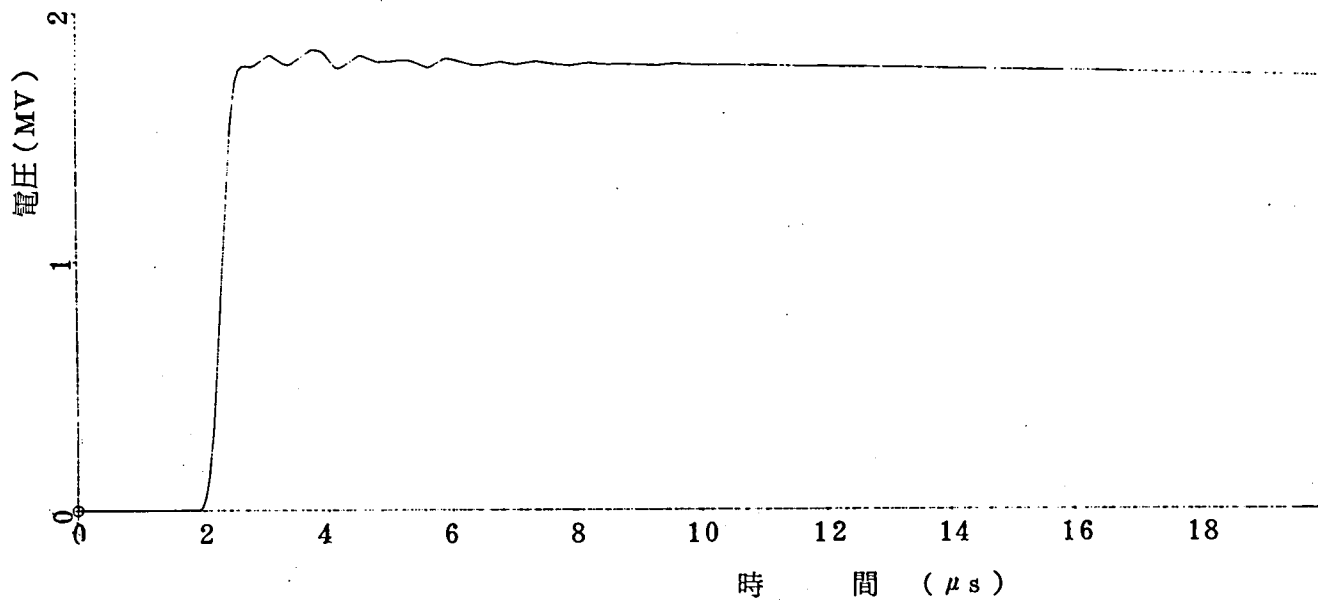
付4-9図(b) ケース  $V_1 - P_3 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—線路用しゝ断器線路端の電位—



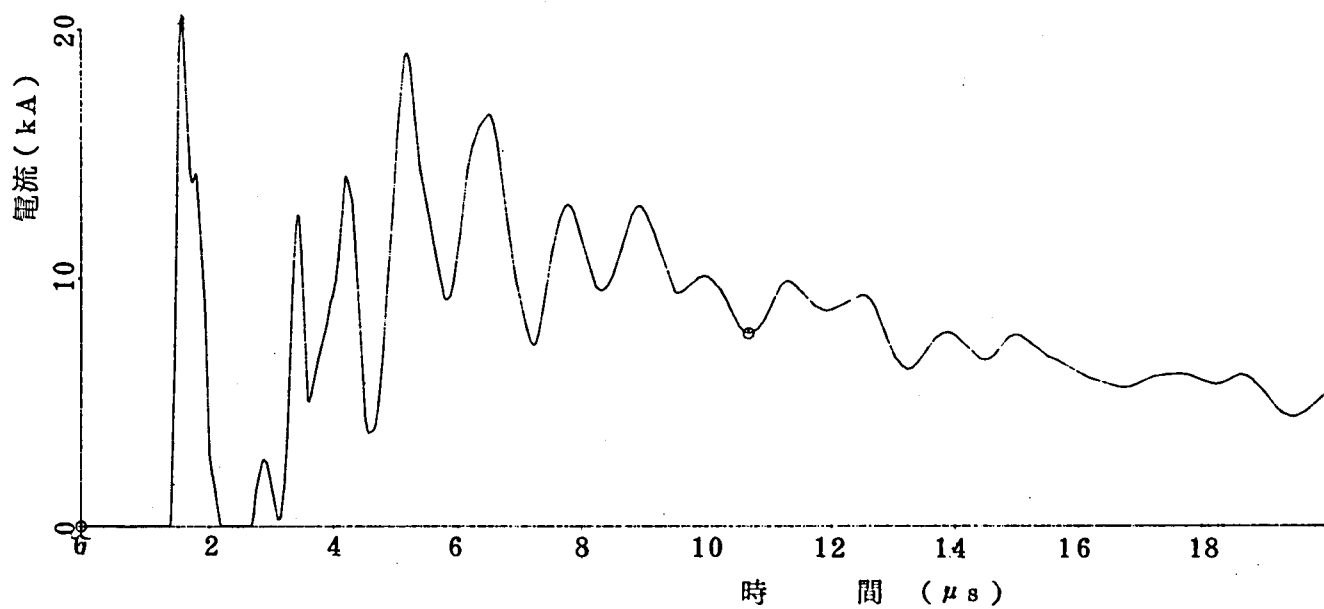
付4-9図(c) ケース  $V_1 - P_3 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—母線区分断器開放端の電位—



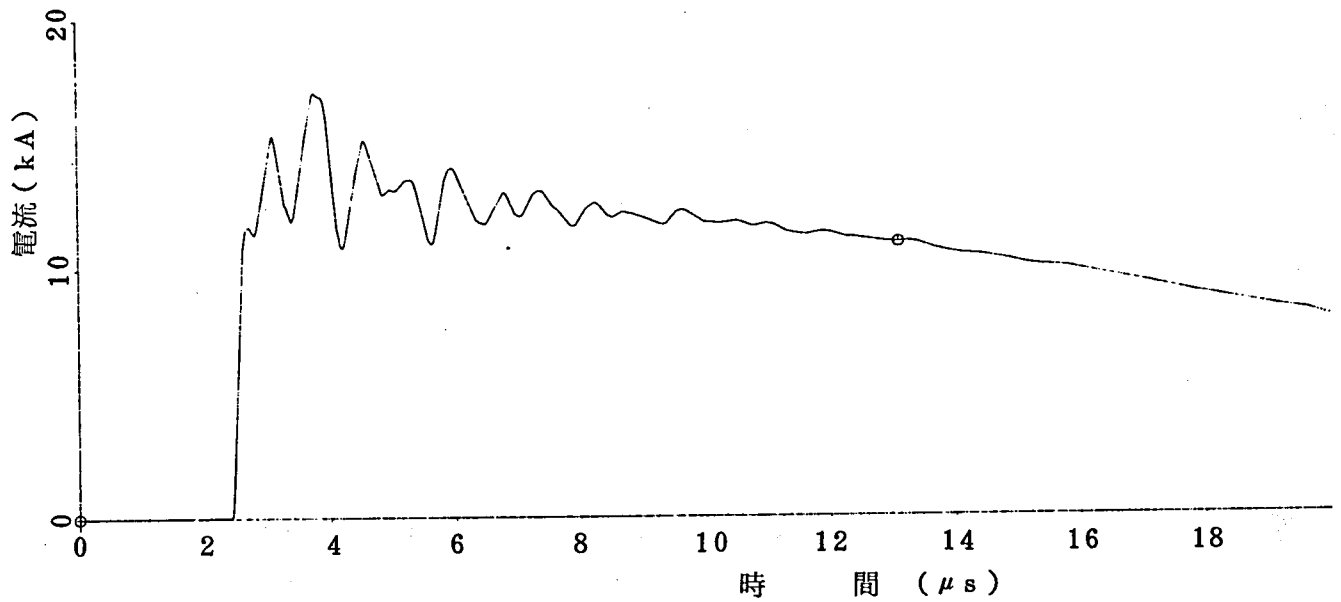
付4-9図(d) ケース  $V_1-P_3-P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



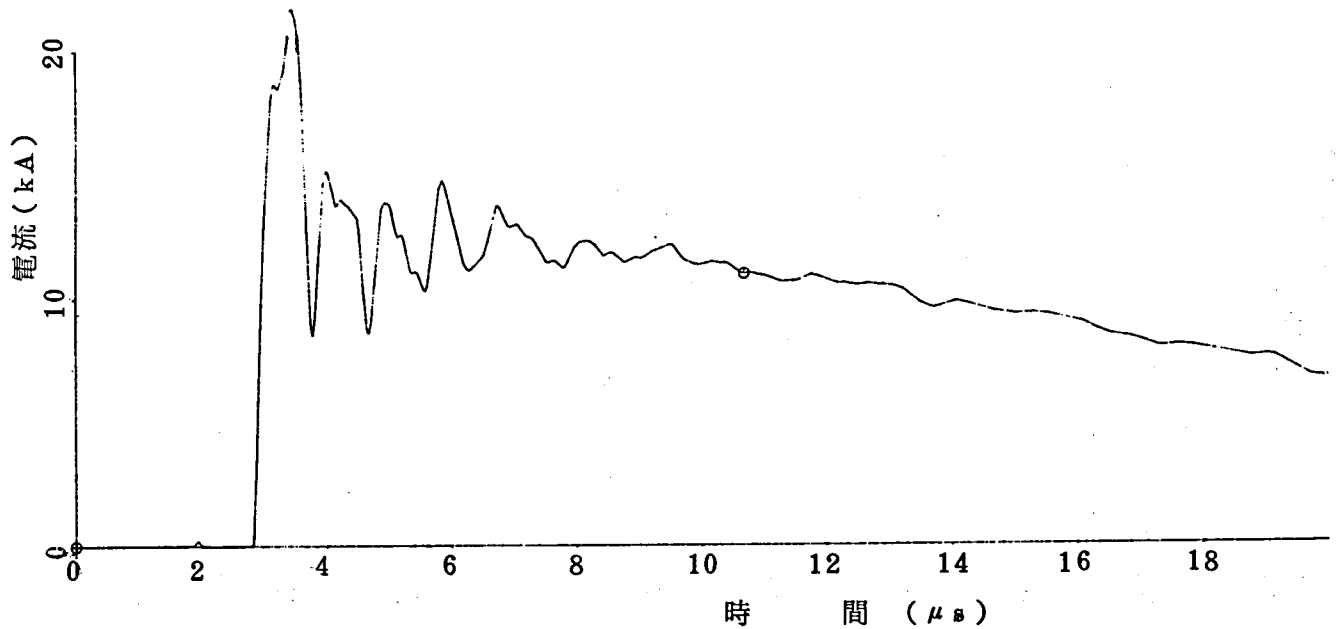
付4-9図(e) ケース  $V_1-P_3-P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



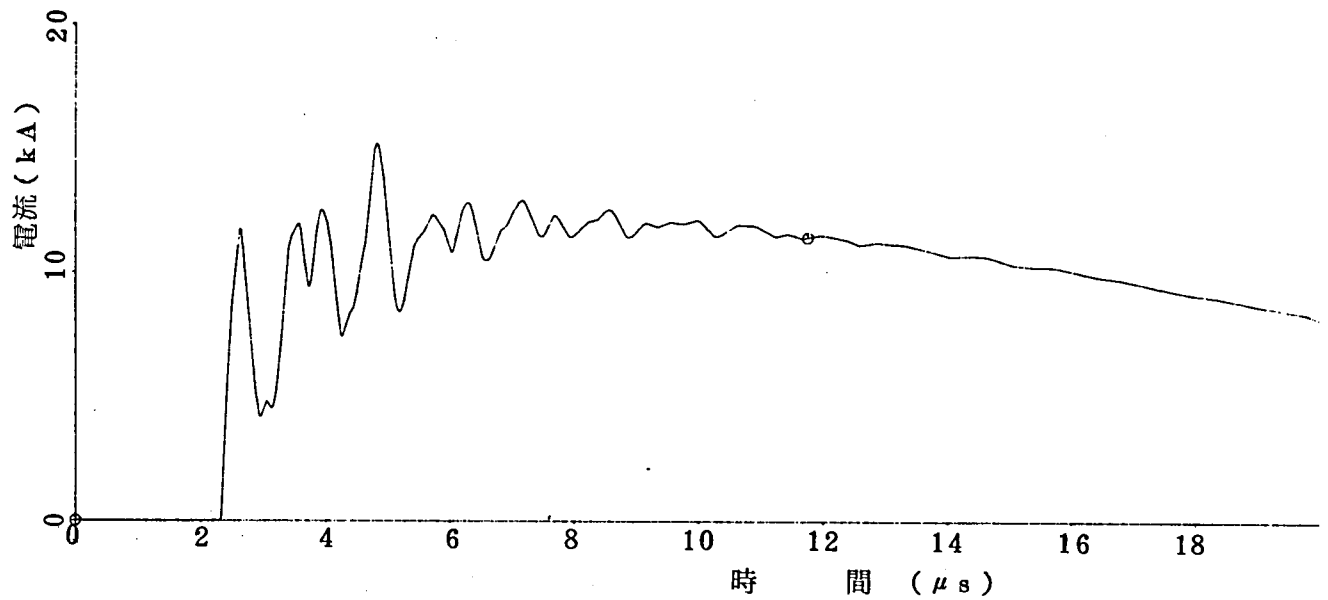
付4-9図(f) ケース  $V_1-P_3-P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—



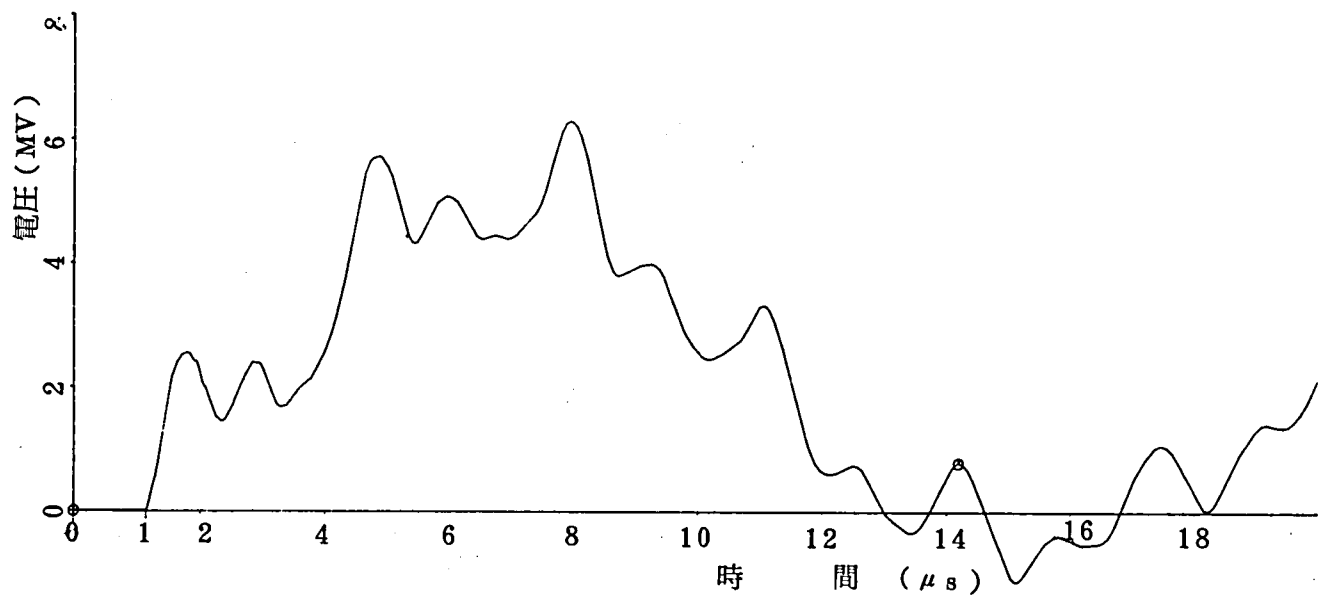
付4-9図(g) ケース  $V_1-P_3-P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_3$ 、 $P_{15}$  に避雷器を設置)

—母線  $P_3$  の避雷器の電流波形—



付4-9図(h) ケース V<sub>1</sub>-P<sub>3</sub>-P<sub>15</sub> (GIS入口、変圧器端、母線 P<sub>3</sub>、P<sub>15</sub> に避雷器を設置)

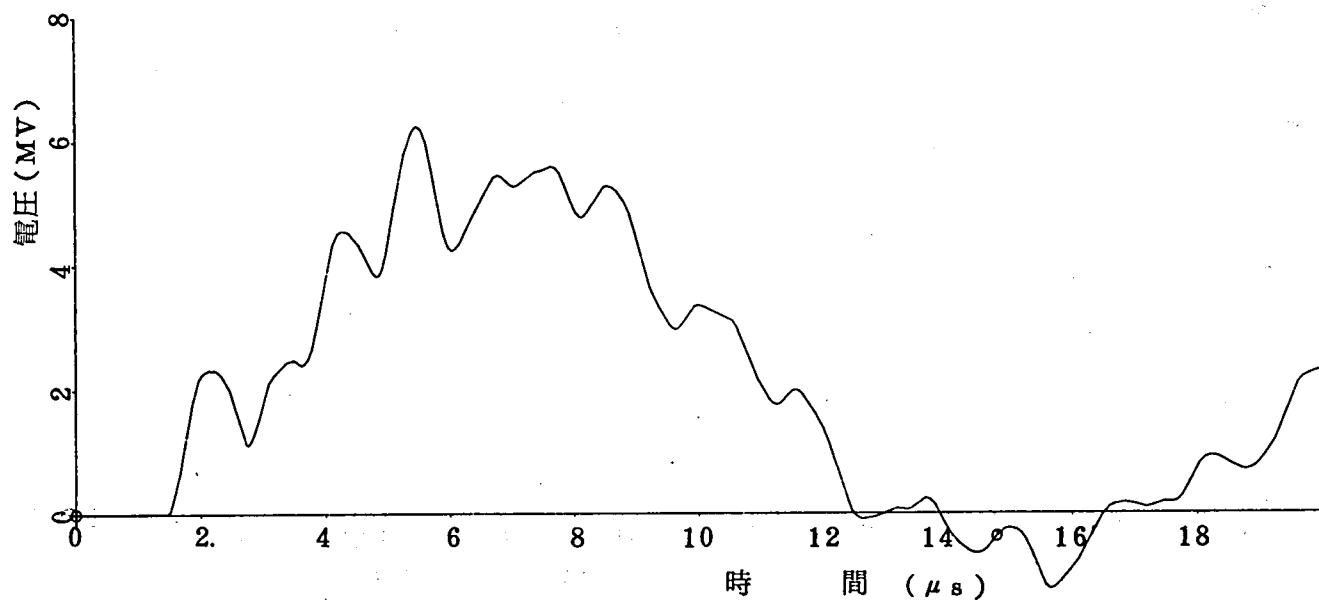
—母線 P<sub>15</sub> の避雷器の電流波形—



付4-10図(a) ケース I<sub>2</sub> (避雷器なし)

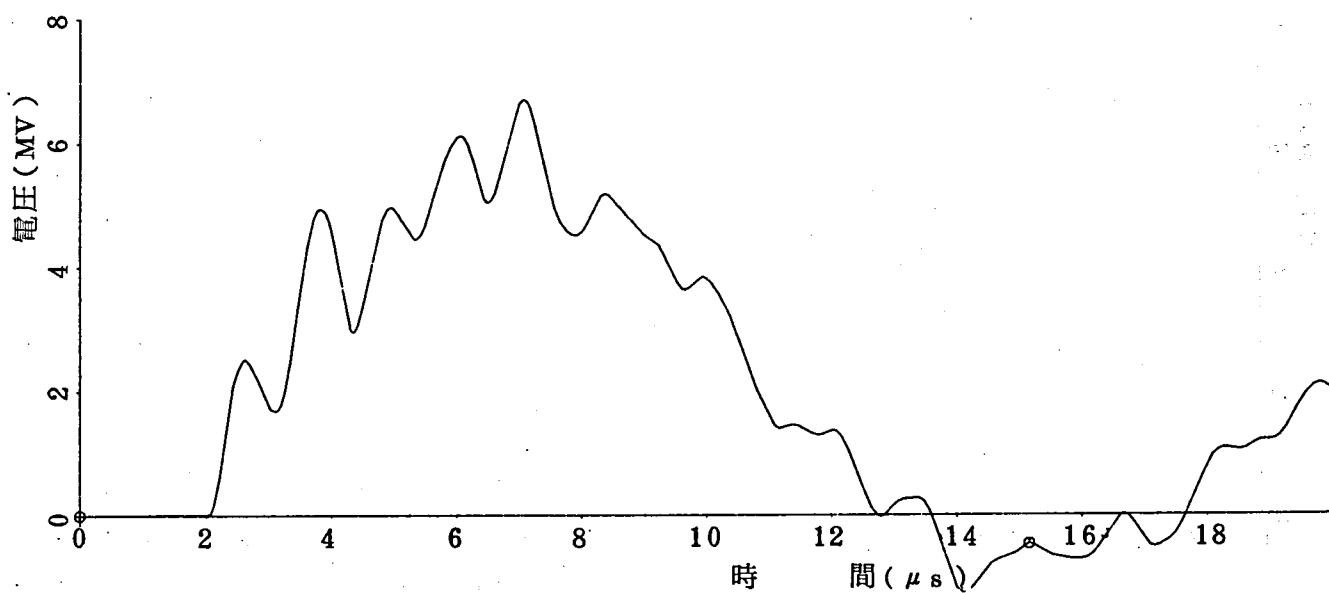
—GIS入口の電位—





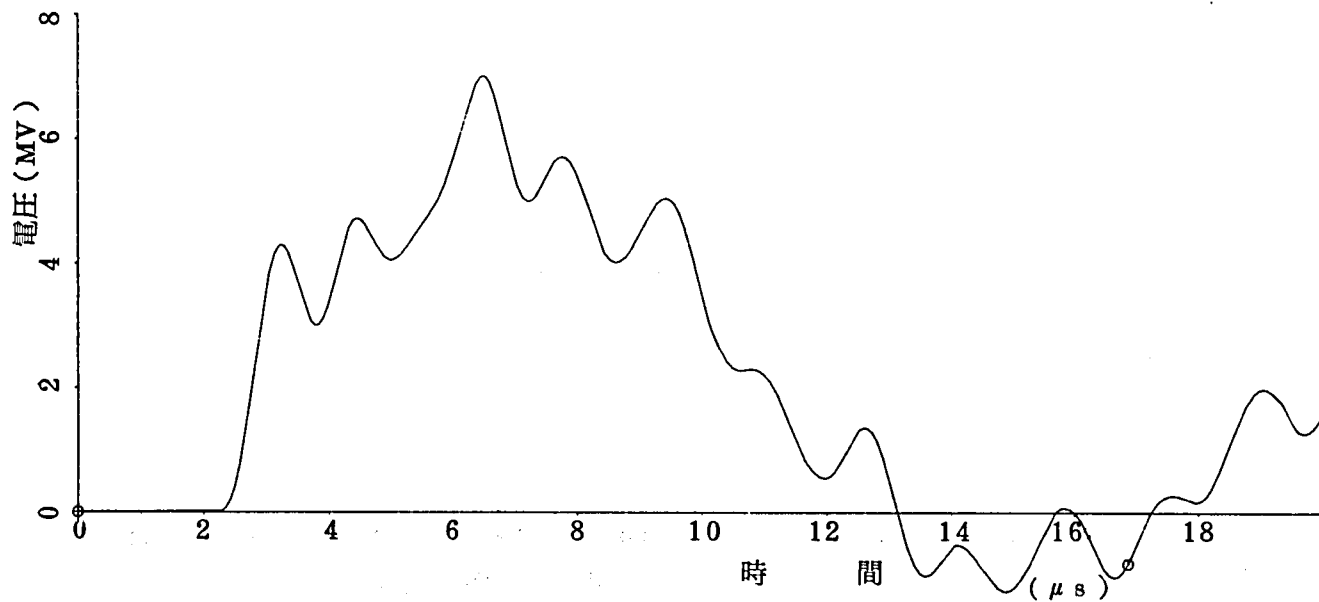
付4-10図(b) ケース 1<sub>2</sub> (避雷器なし)

—線路用しゝ断器線路端の電位—



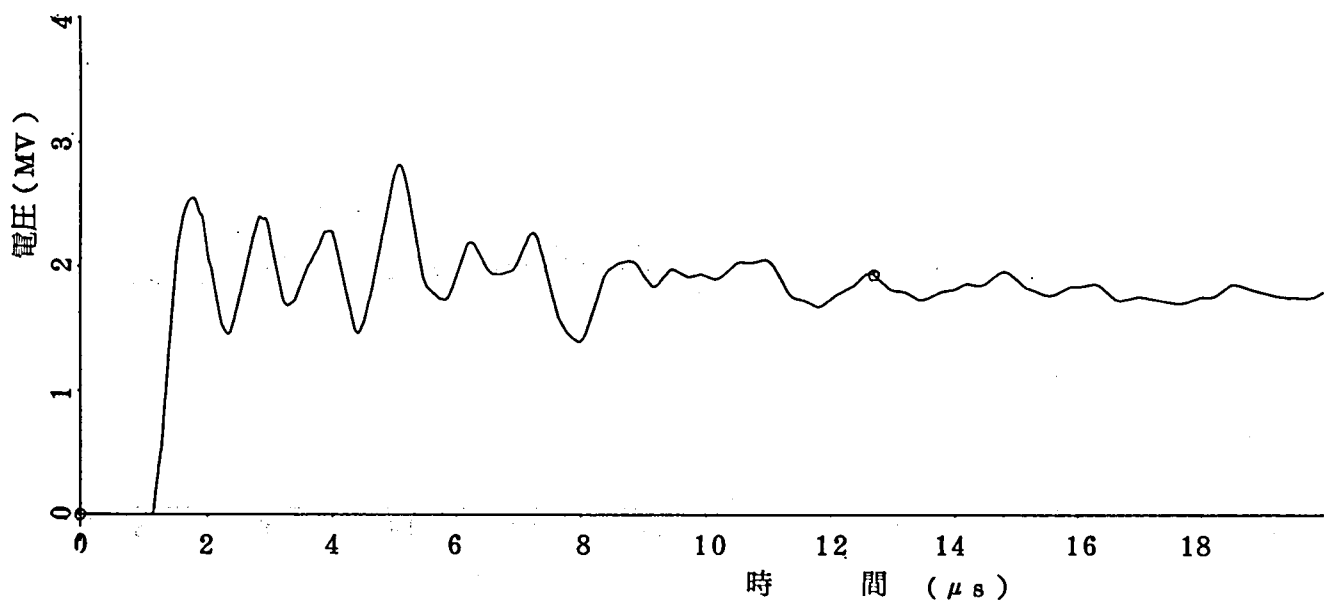
付4-10図(c) ケース 1<sub>2</sub> (避雷器なし)

—母線区分断器開放端の電位—



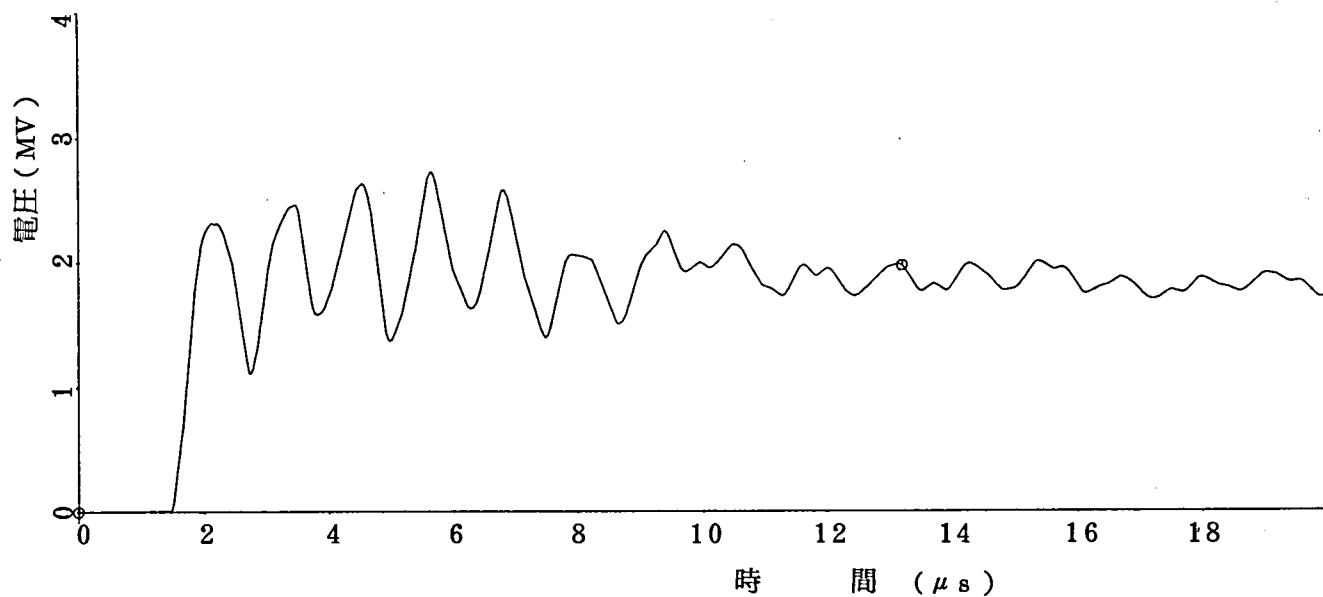
付4-10 図(d) ケース 1<sub>2</sub> (避雷器なし)

—変圧器端の電位—



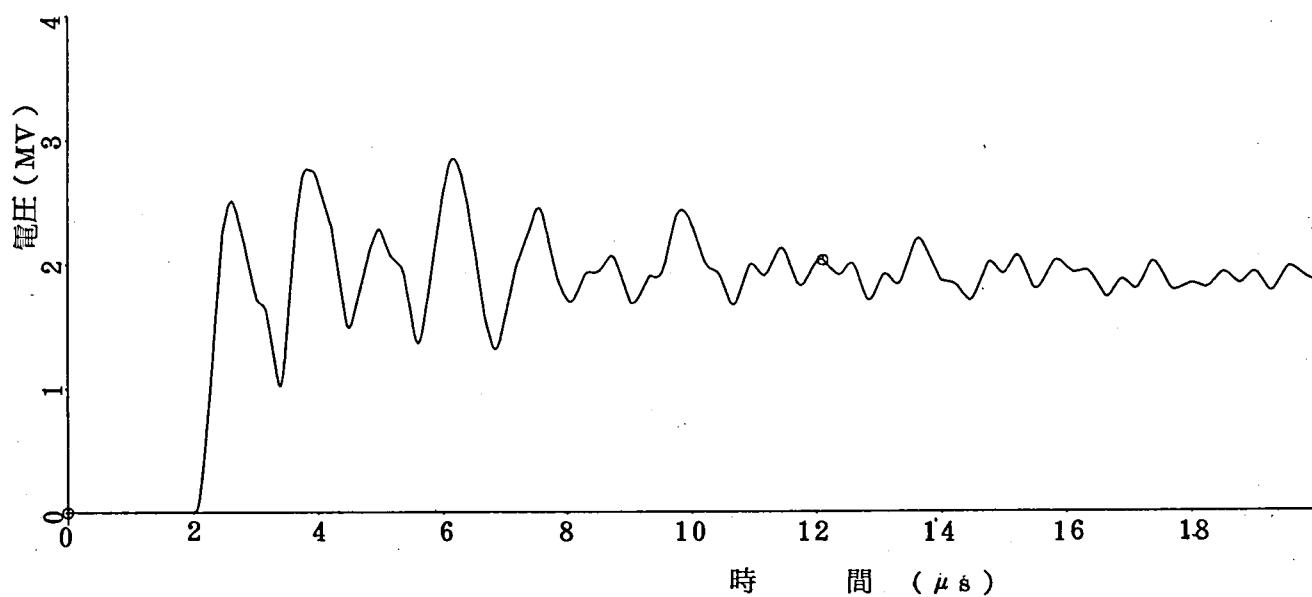
付4-11 図(a) ケース 1<sub>2</sub> (変圧器端に避雷器を設置)

—入口の電位—



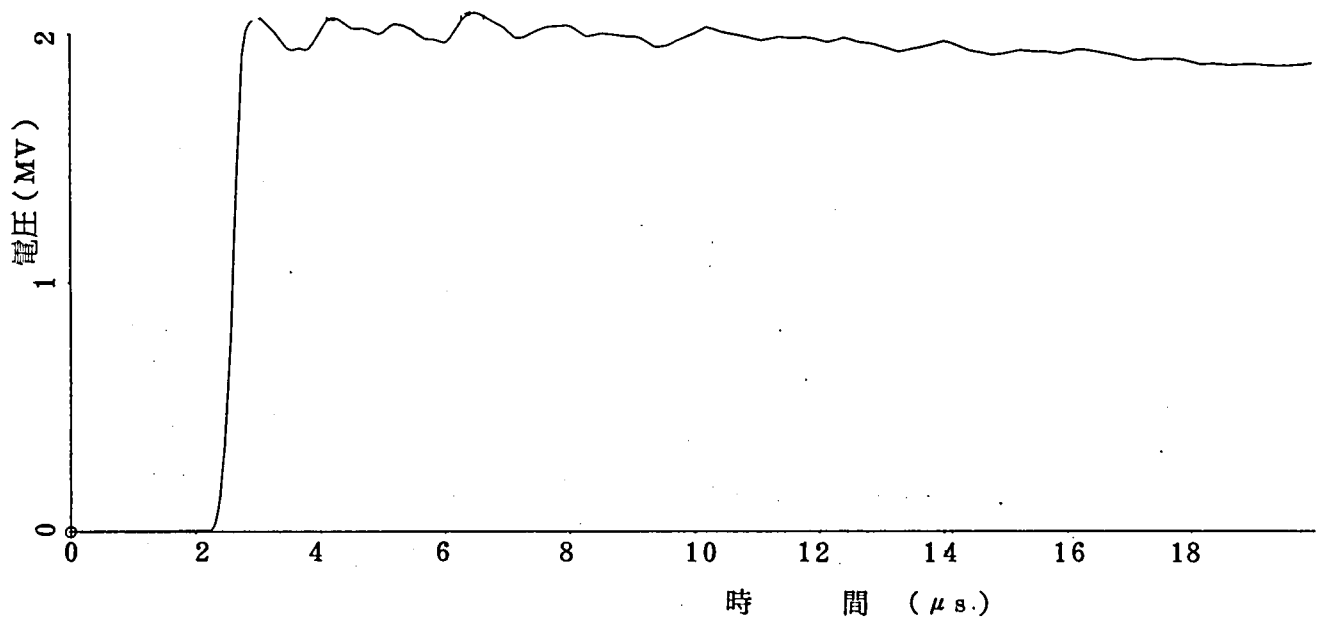
付 4 - 11 図(b) ケース II<sub>2</sub> (変圧器端に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



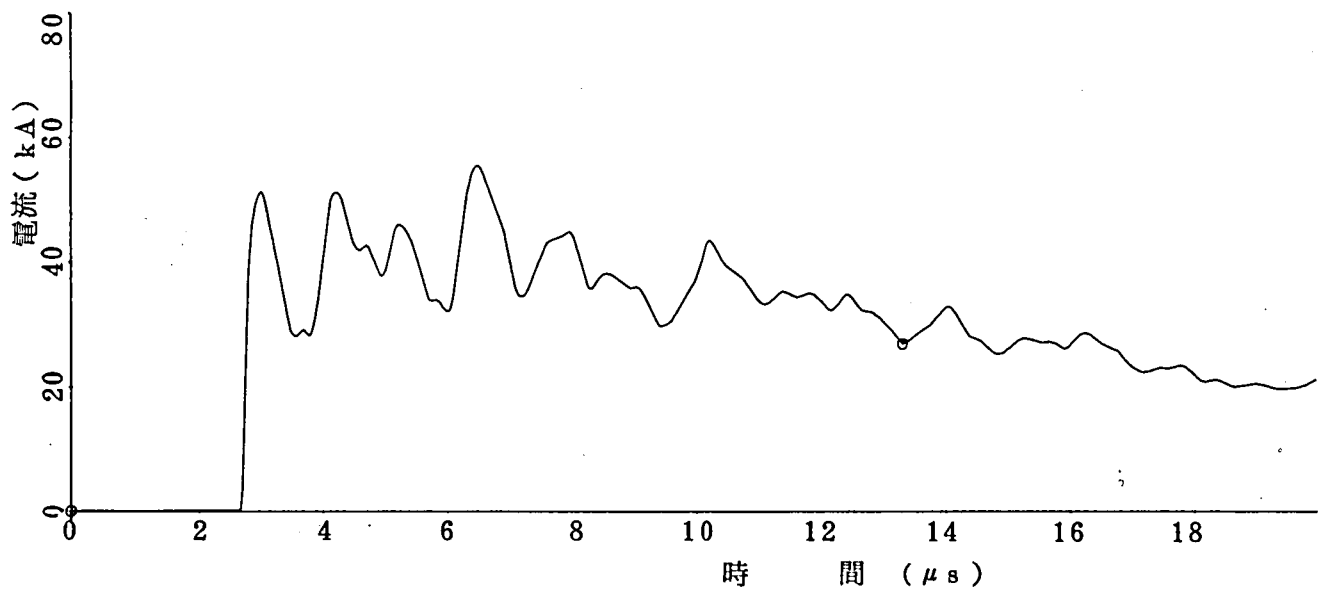
付 4 - 11 図(c) ケース II<sub>2</sub> (変圧器端に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



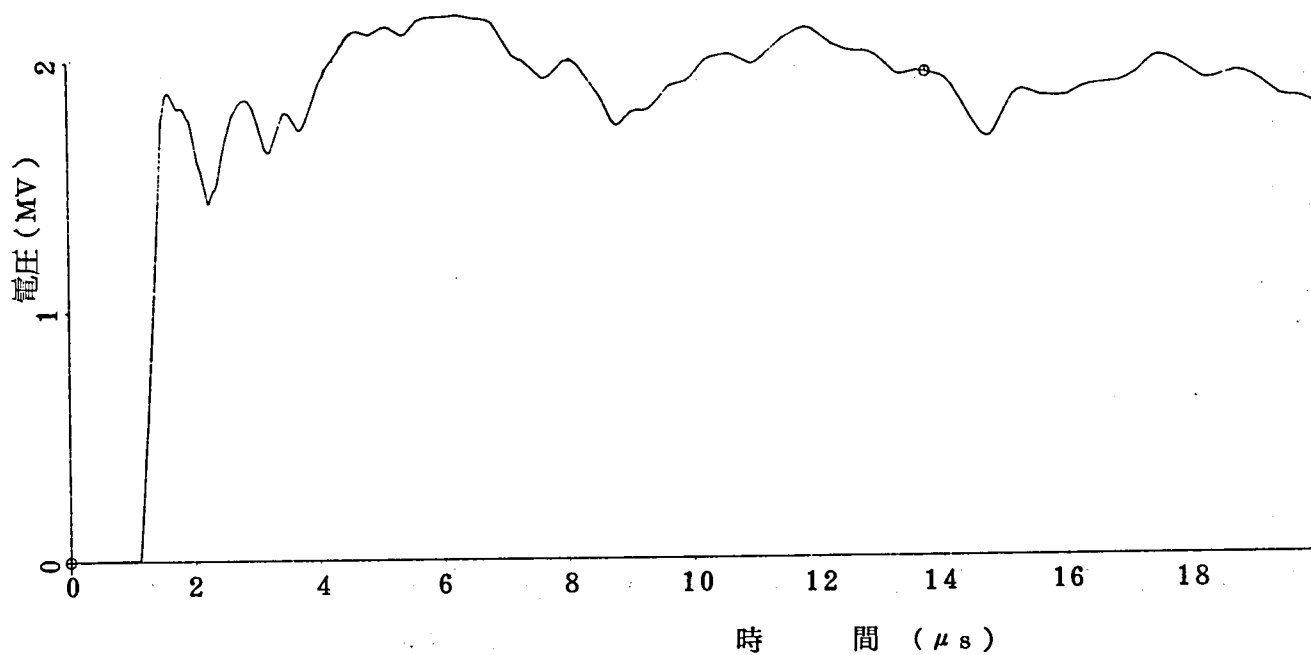
付 4 - 11 図(d) ケース 12 (変圧器端に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



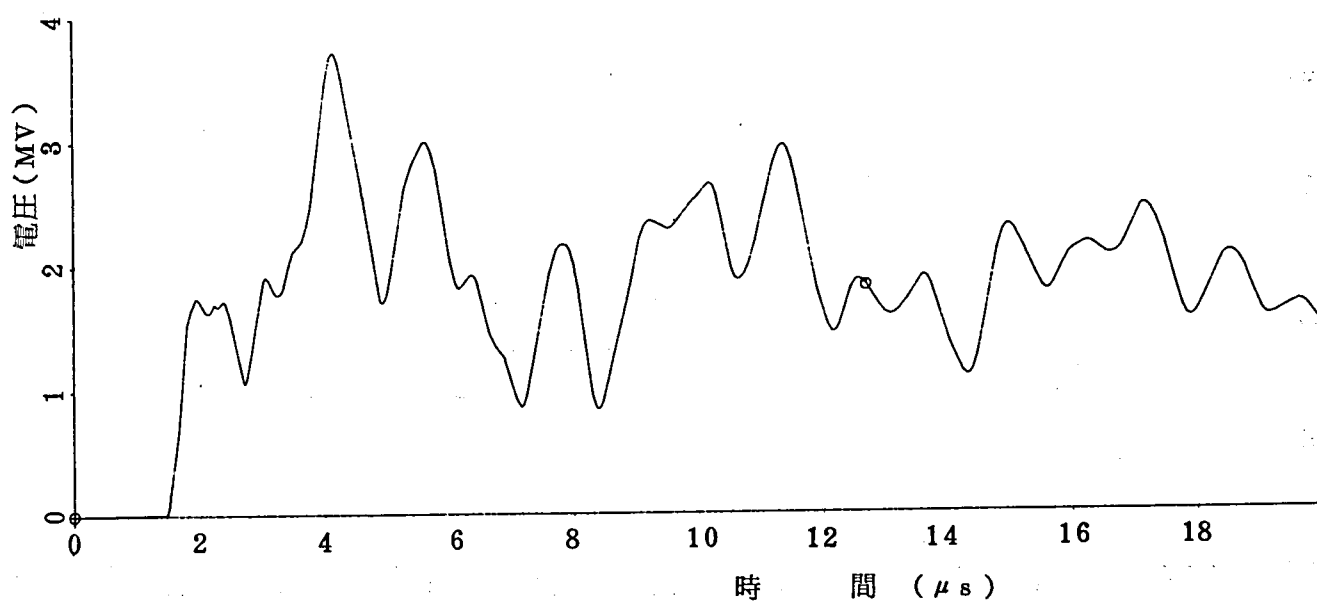
付 4 - 11 図(e) ケース 12 (変圧器端に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—



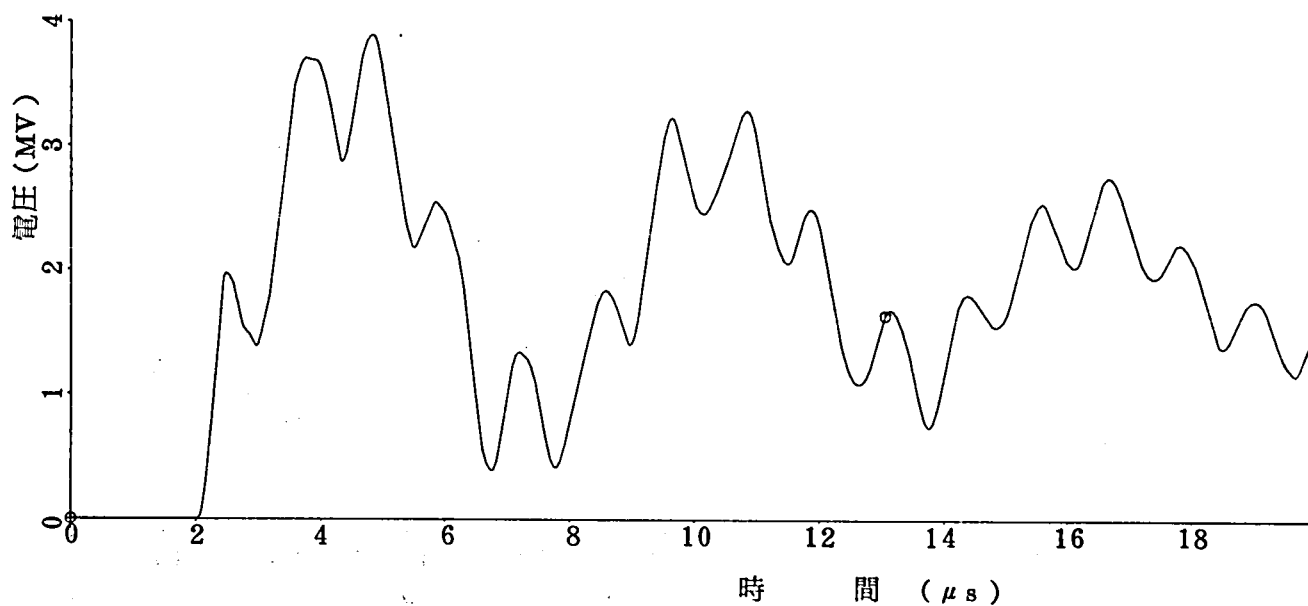
付4-12図(a) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



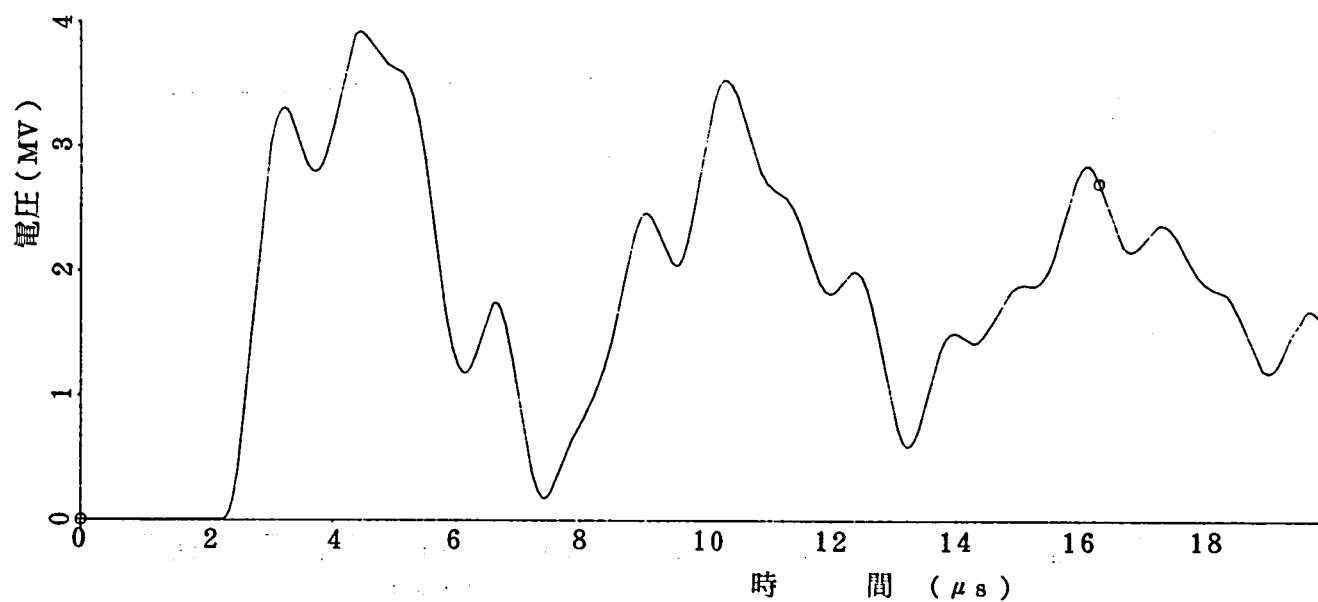
付4-12図(b) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



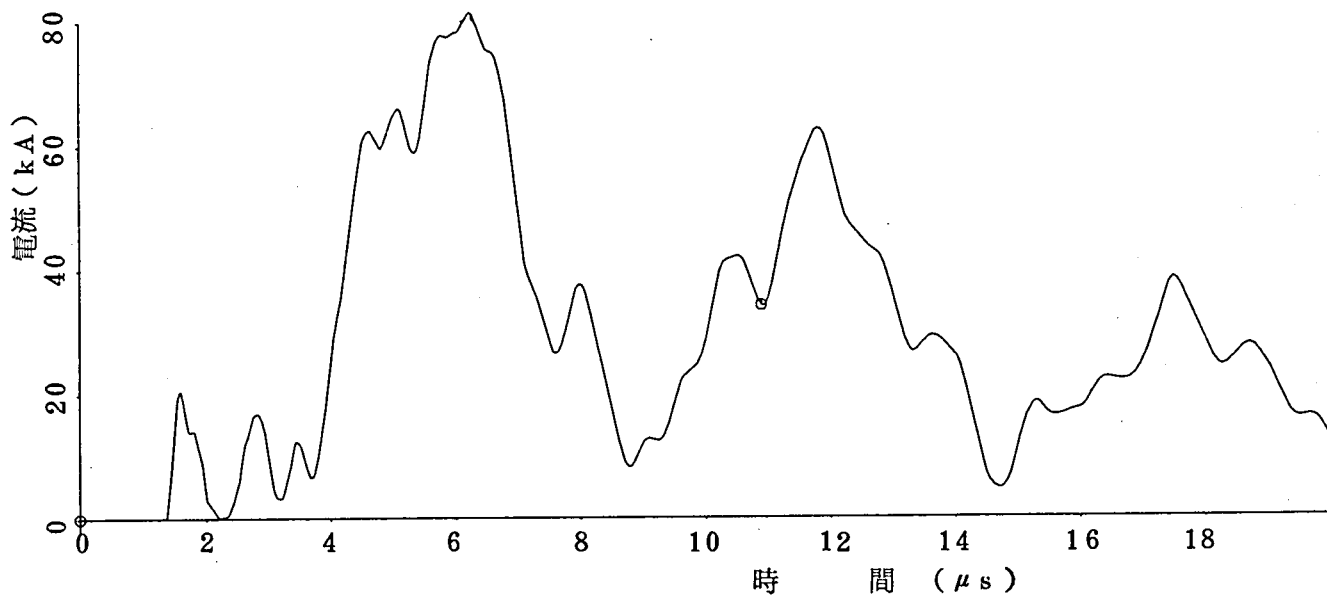
付 4 - 12 図(c) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS 入口に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



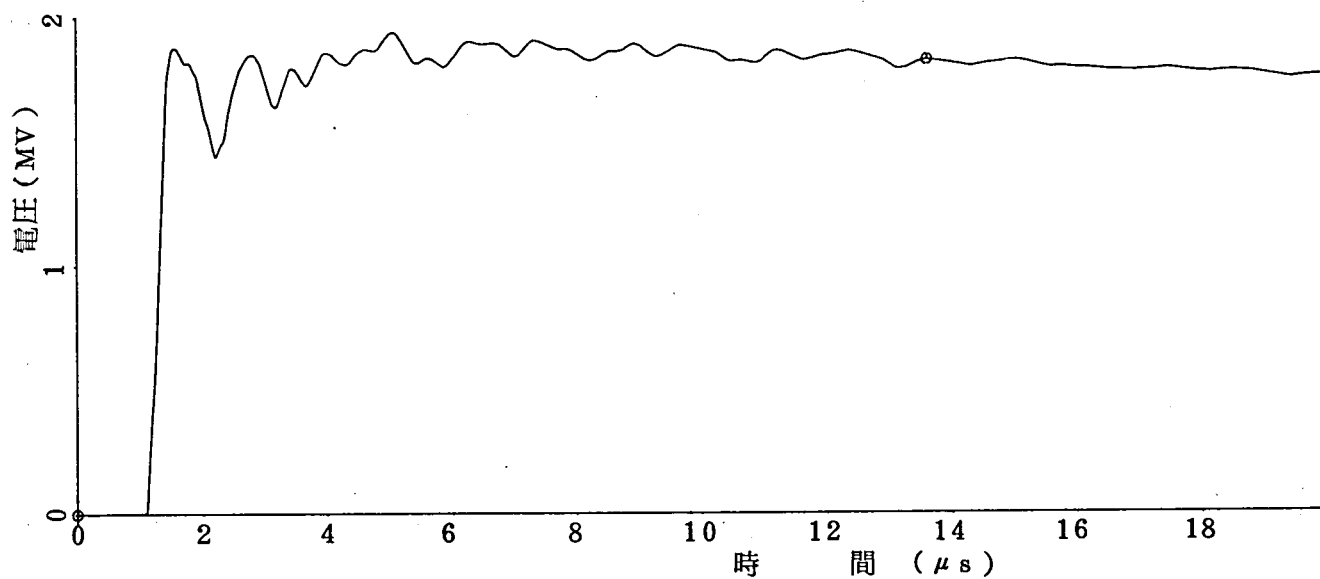
付 4 - 12 図(d) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS 入口に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



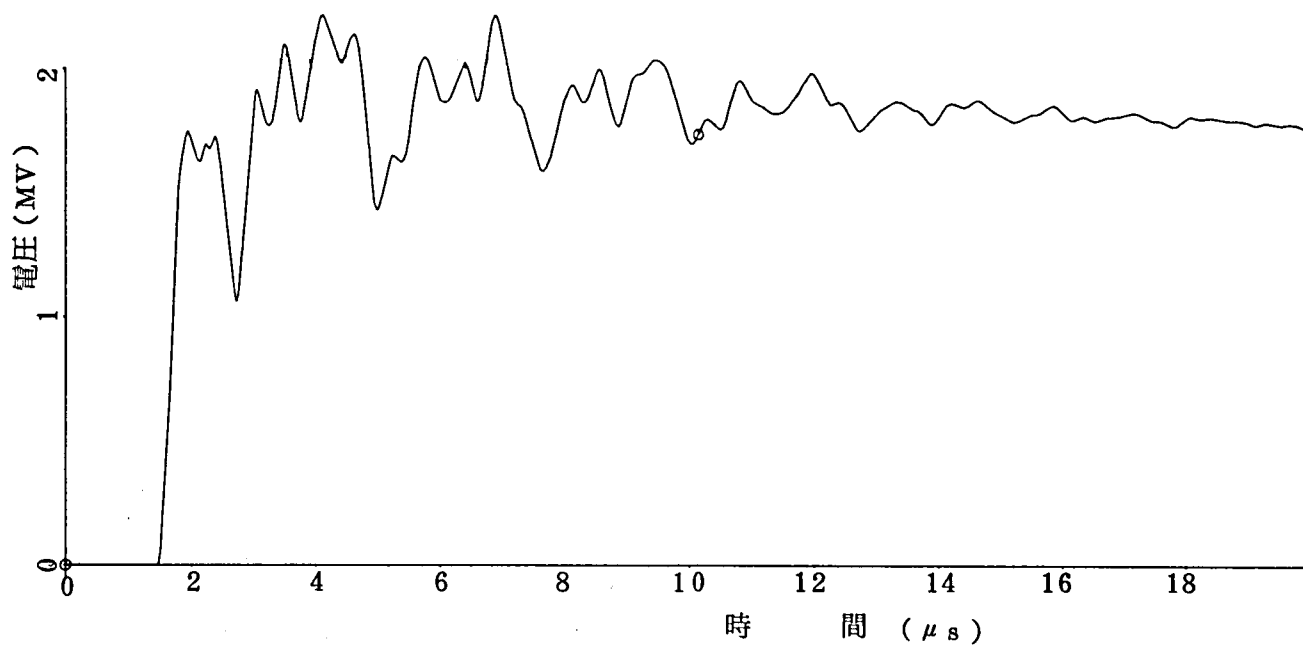
付4-12図(e) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



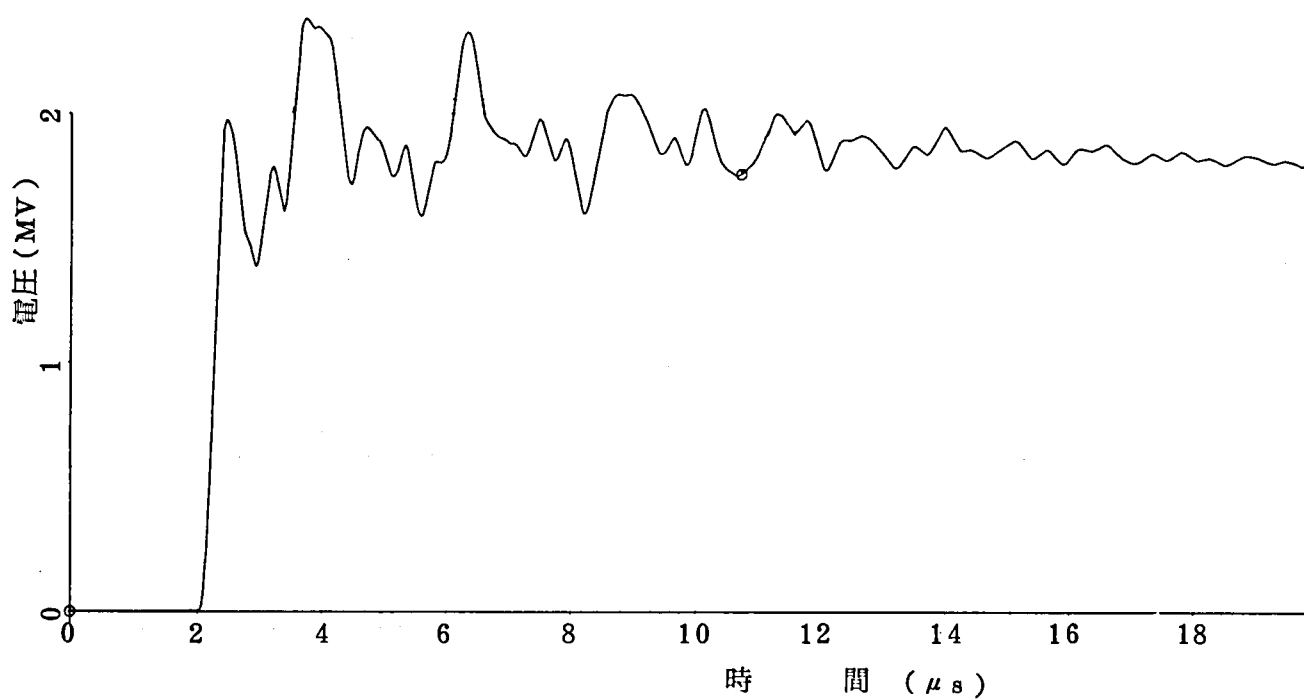
付4-13図(a) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



付4-13図(b) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

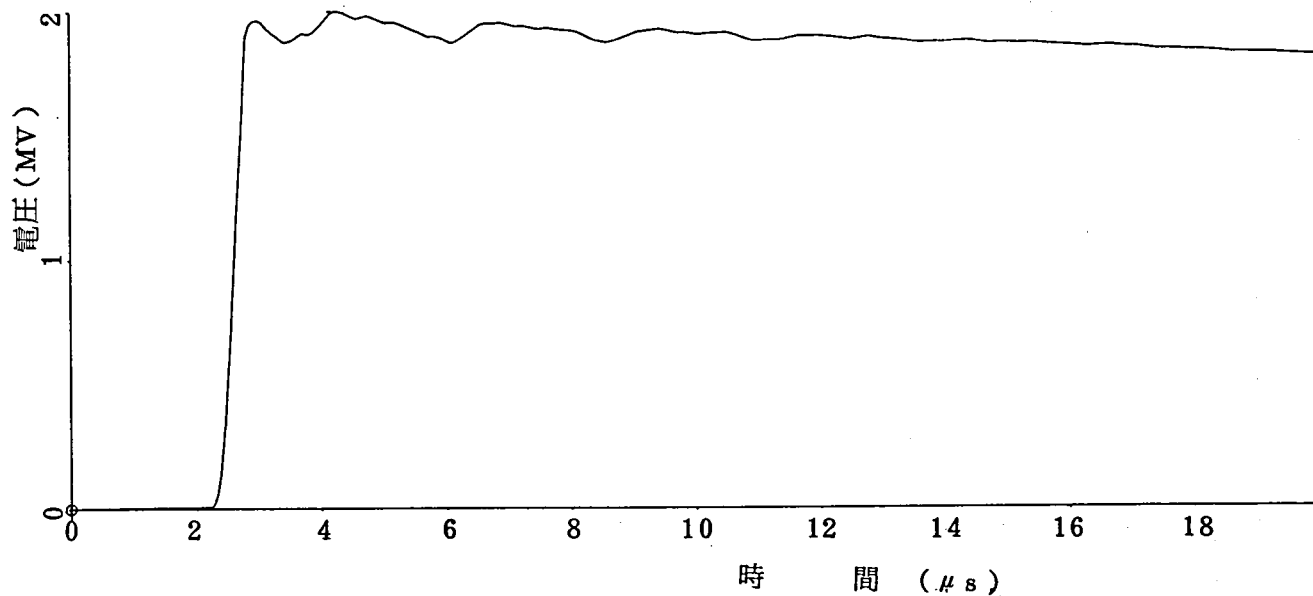
—線路用しゃ断器線路端の電位—



付4-13図(c) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

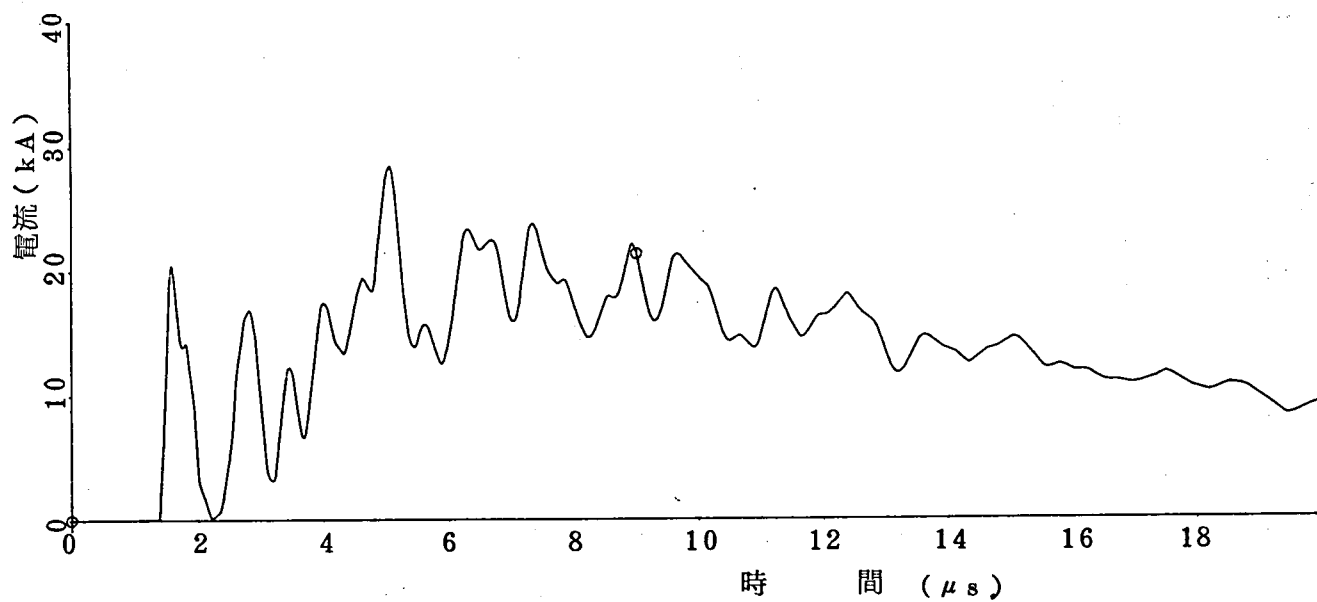
—母線区分断路器開放端の電位—





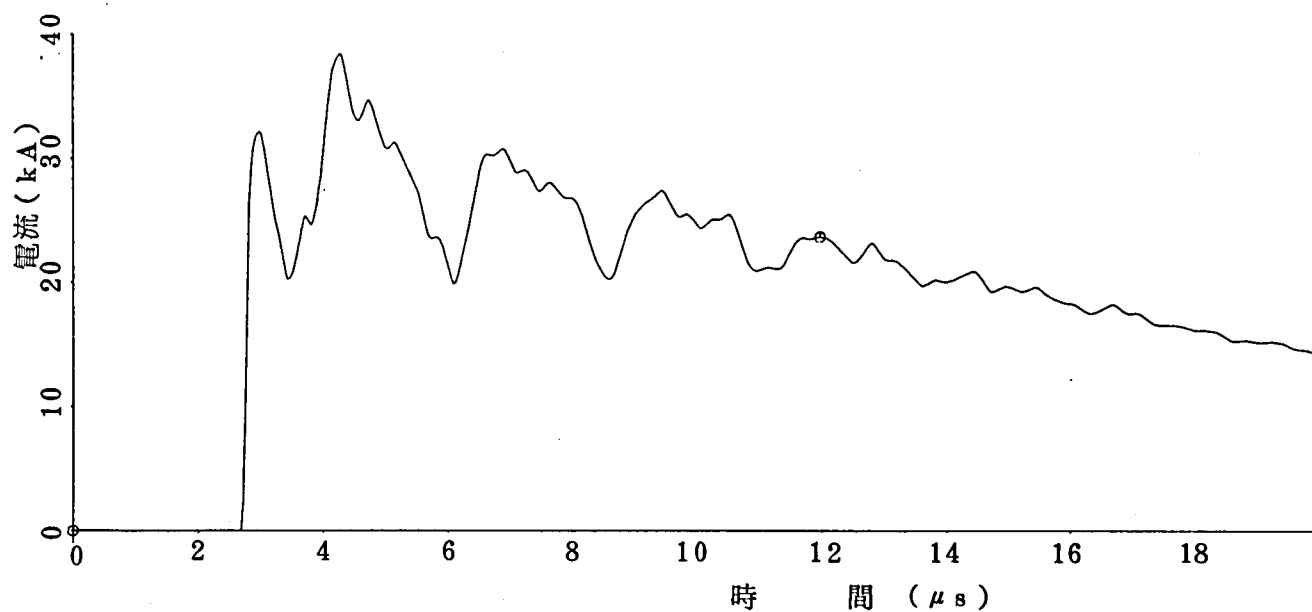
付4-13図(d) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



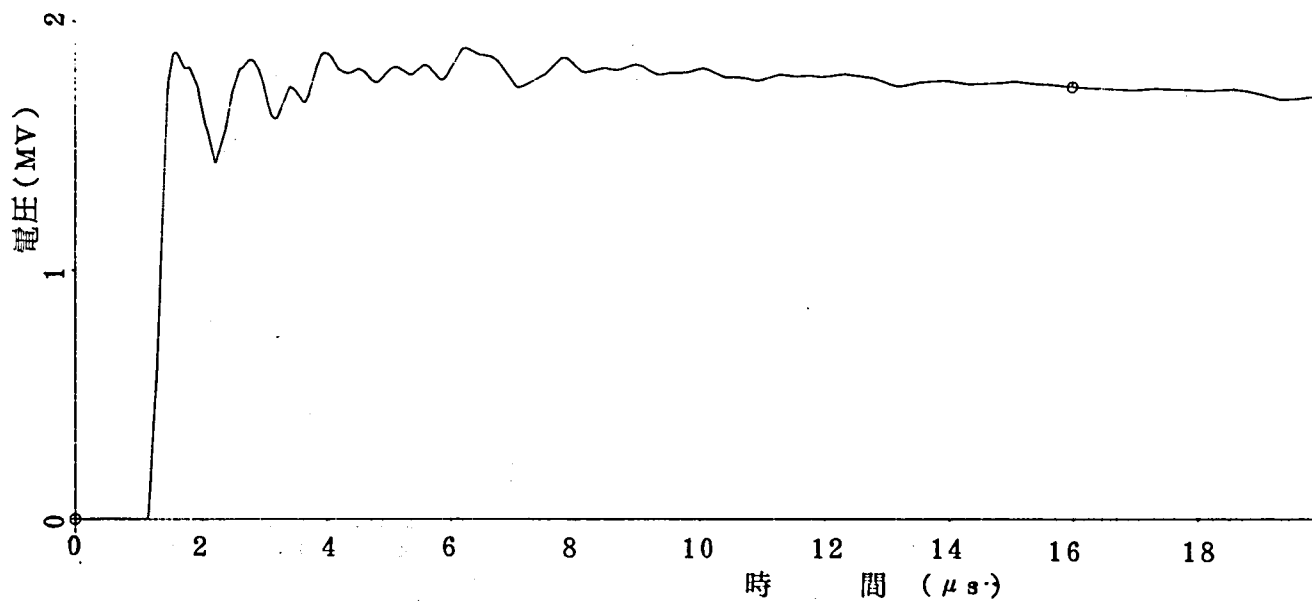
付4-13図(e) ケースⅡ<sub>2</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



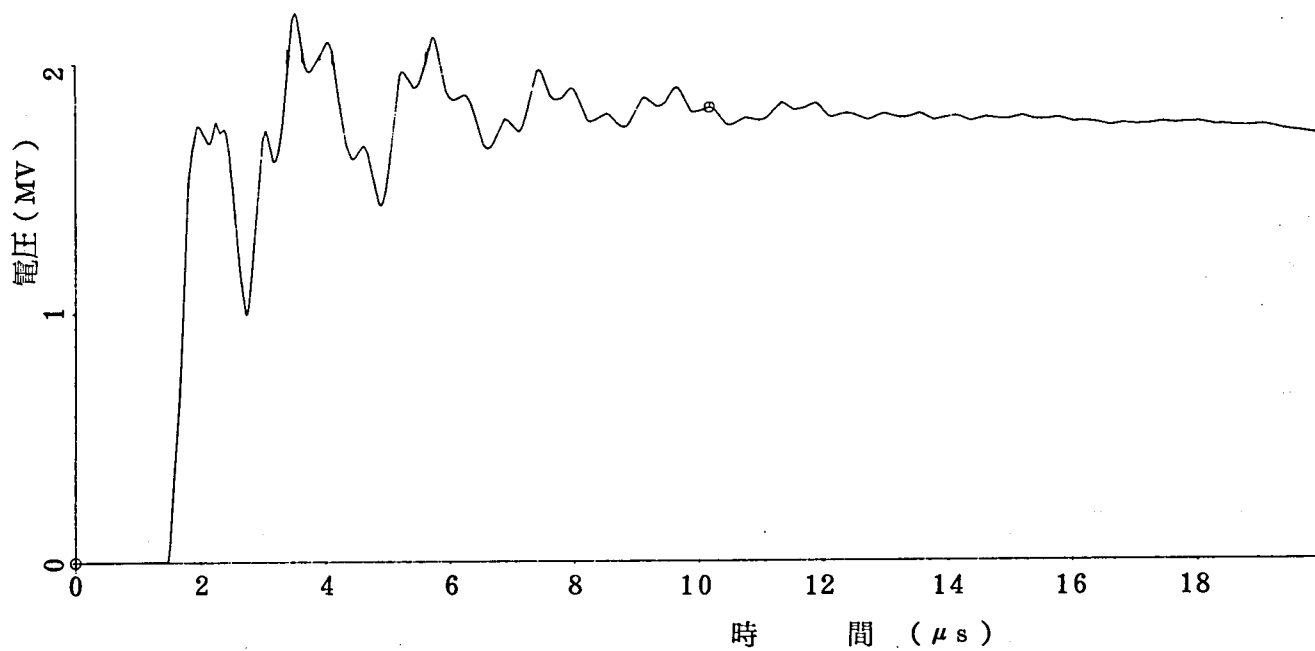
付4-13図(f) ケースⅣ<sub>2</sub> (GIS入口、変圧器端に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—



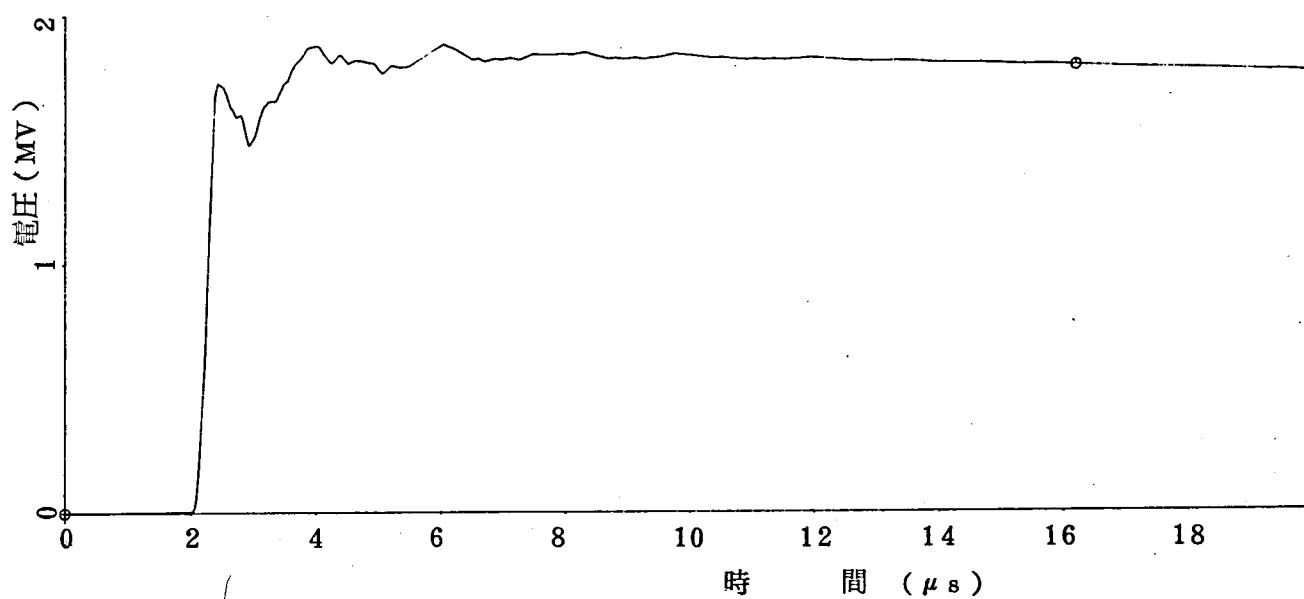
付4-14図(a) ケースⅤ<sub>2</sub>-P<sub>15</sub> (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



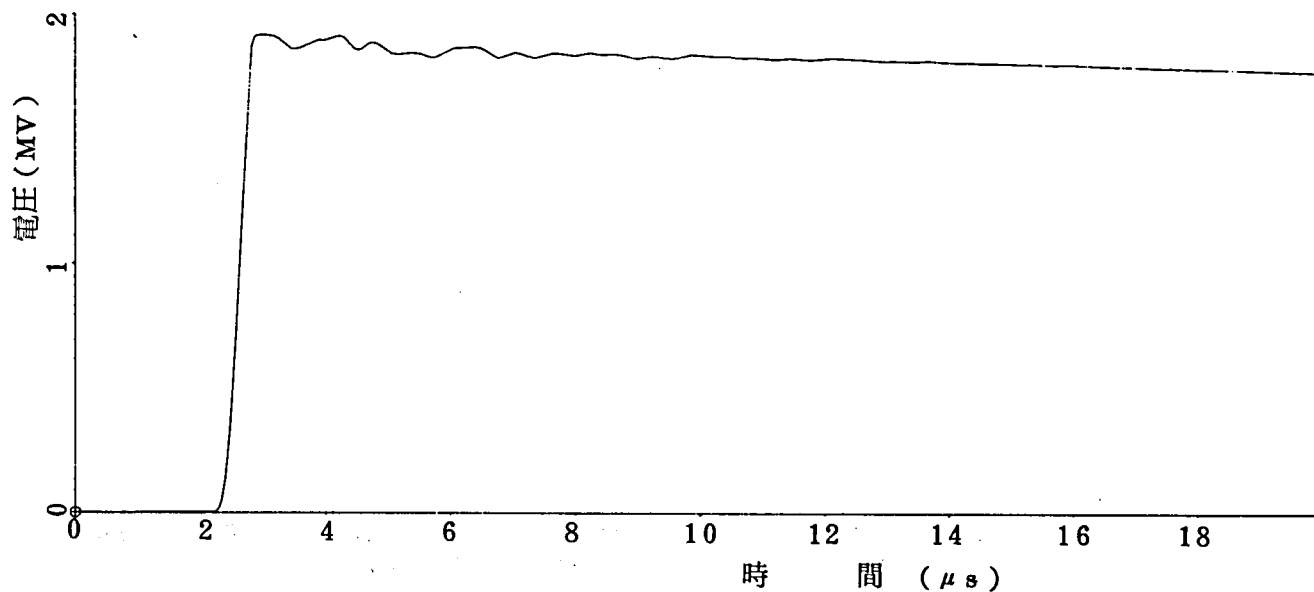
付4-14図(b) ケース  $V_2 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—線路用しゝ断器線路端の電位—



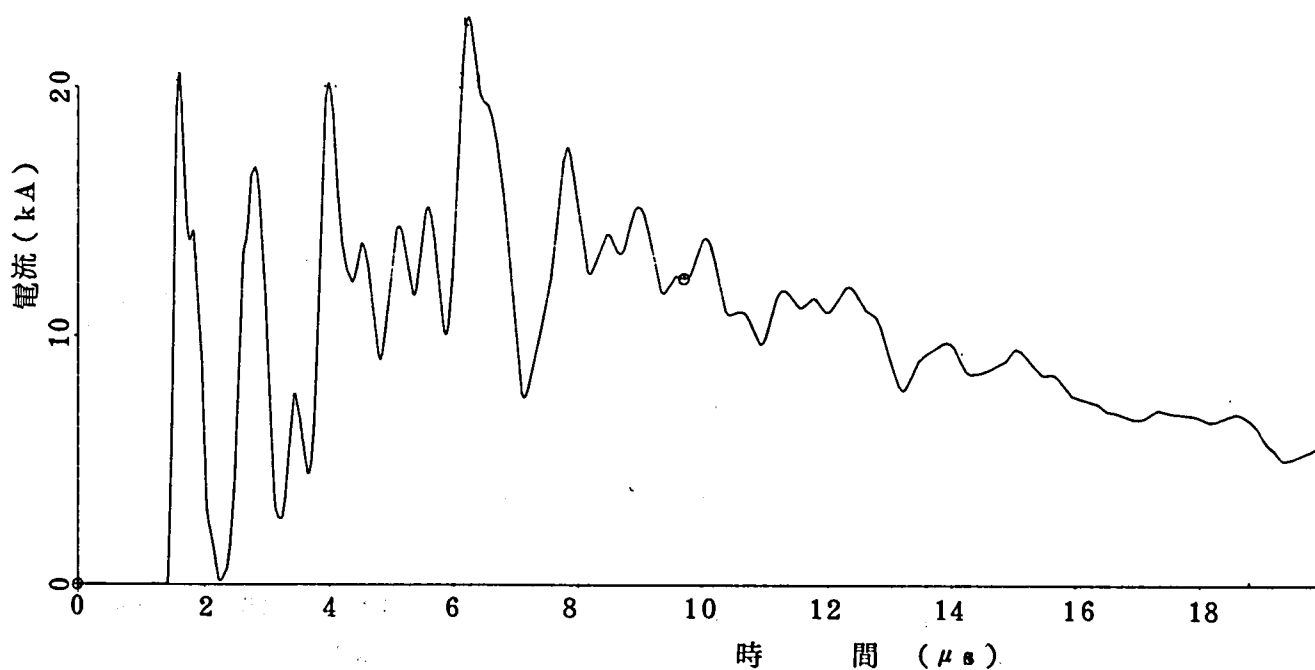
付4-14図(c) ケース  $V_2 - P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



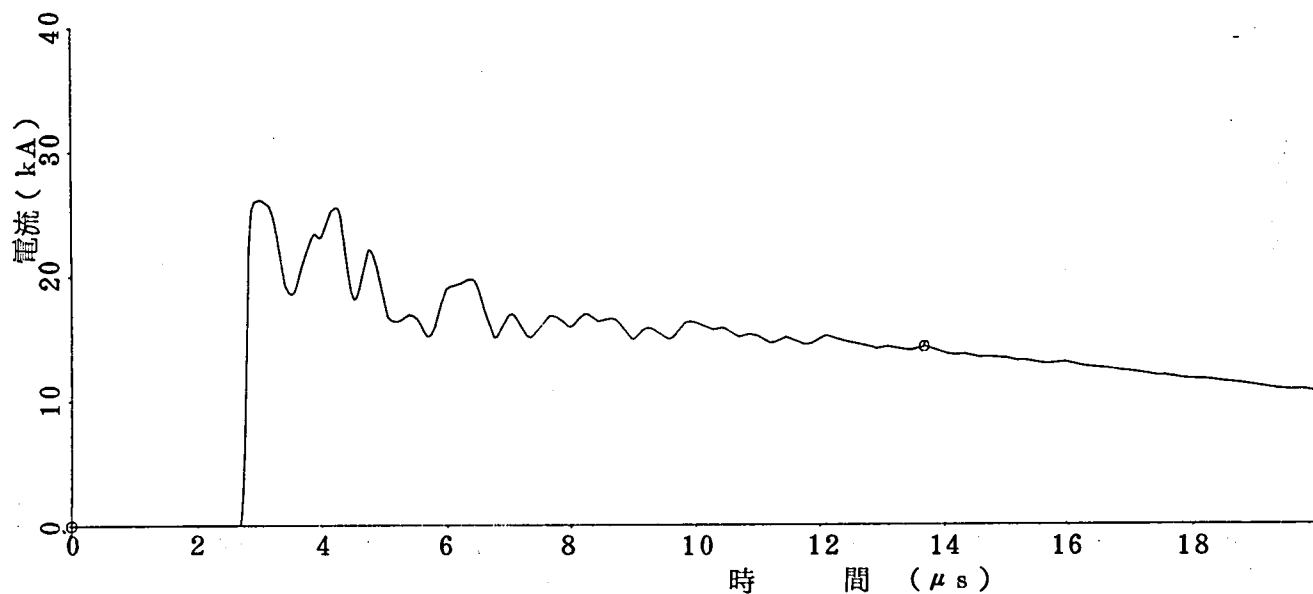
付4-14図(d) ケース  $V_2-P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



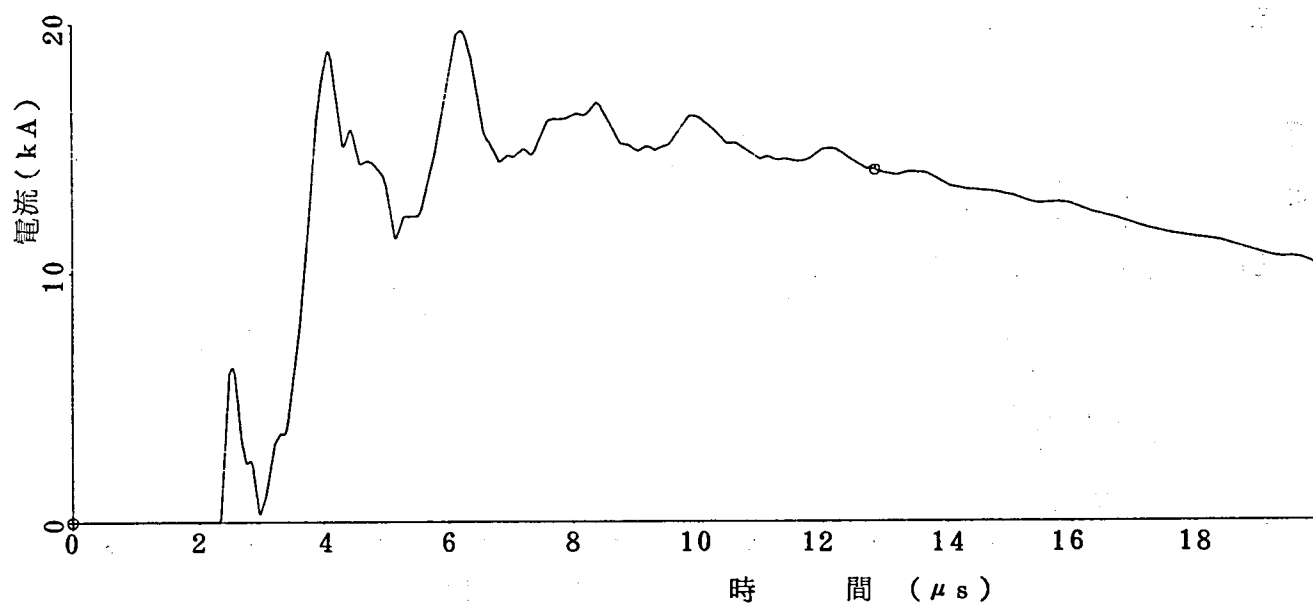
付4-14図(e) ケース  $V_2-P_{15}$  (GIS入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—GIS入口の避雷器の電流波形—



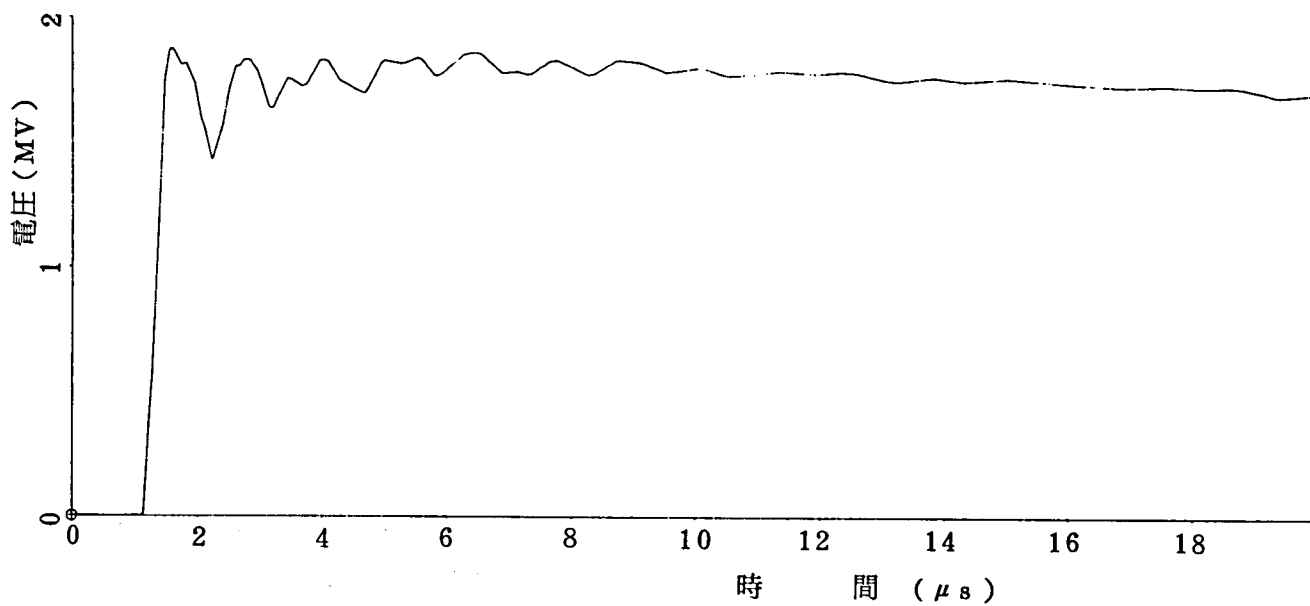
付 4 - 1 4 図(f) ケース  $V_2 - P_{15}$  (GIS 入口、変圧器端、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—変圧器端避雷器の電流波形—



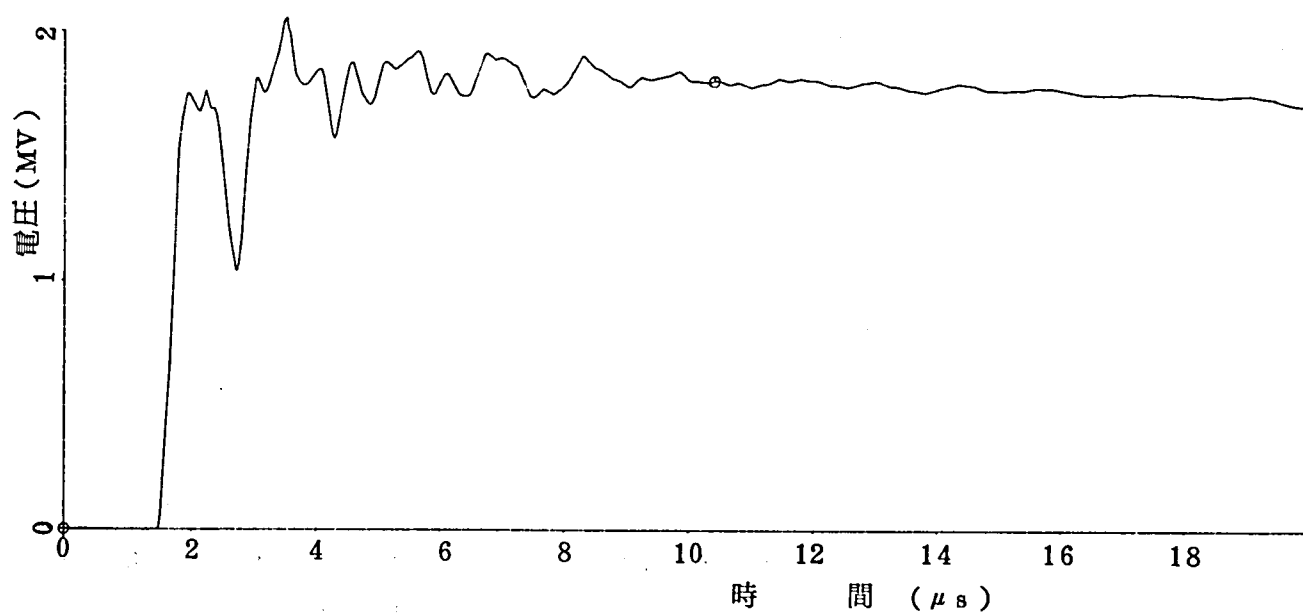
付 4 - 1 4 図(g) ケース  $V_2 - P_{15}$  (GIS 入口、変圧器、母線区分断路器端に避雷器を設置)

—母線  $P_{15}$  避雷器の電流波形—



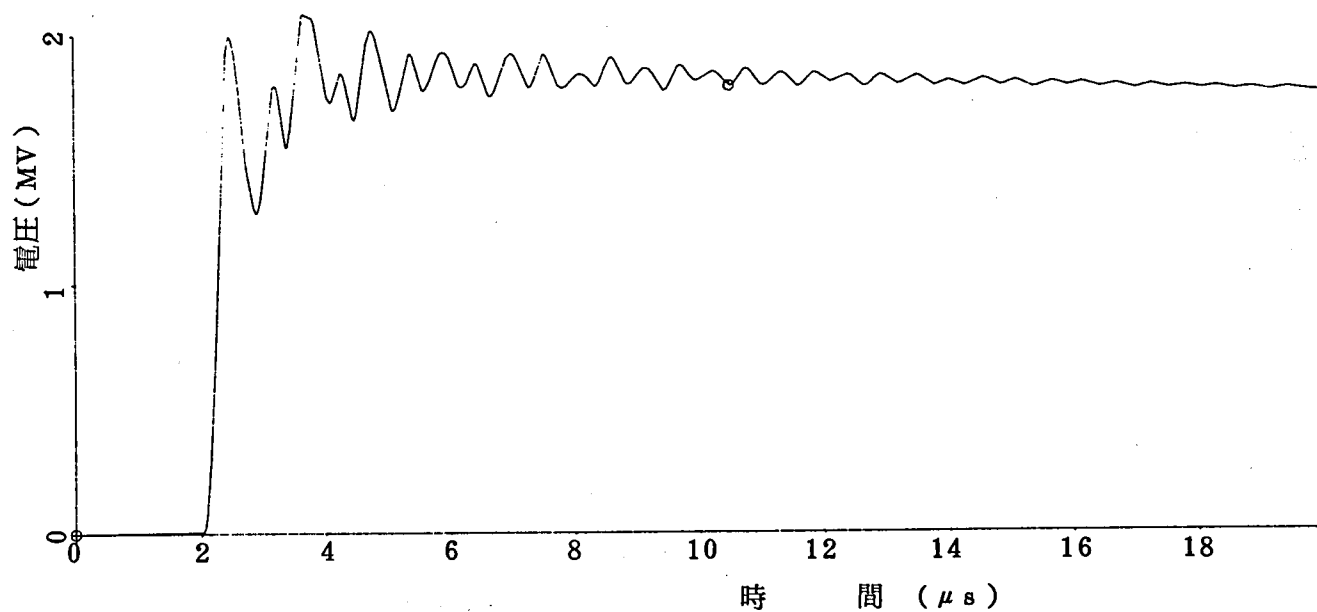
付4-15図(a) ケース  $V_2 - P_{12}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_{12}$  に避雷器を設置)

—GIS入口の電位—



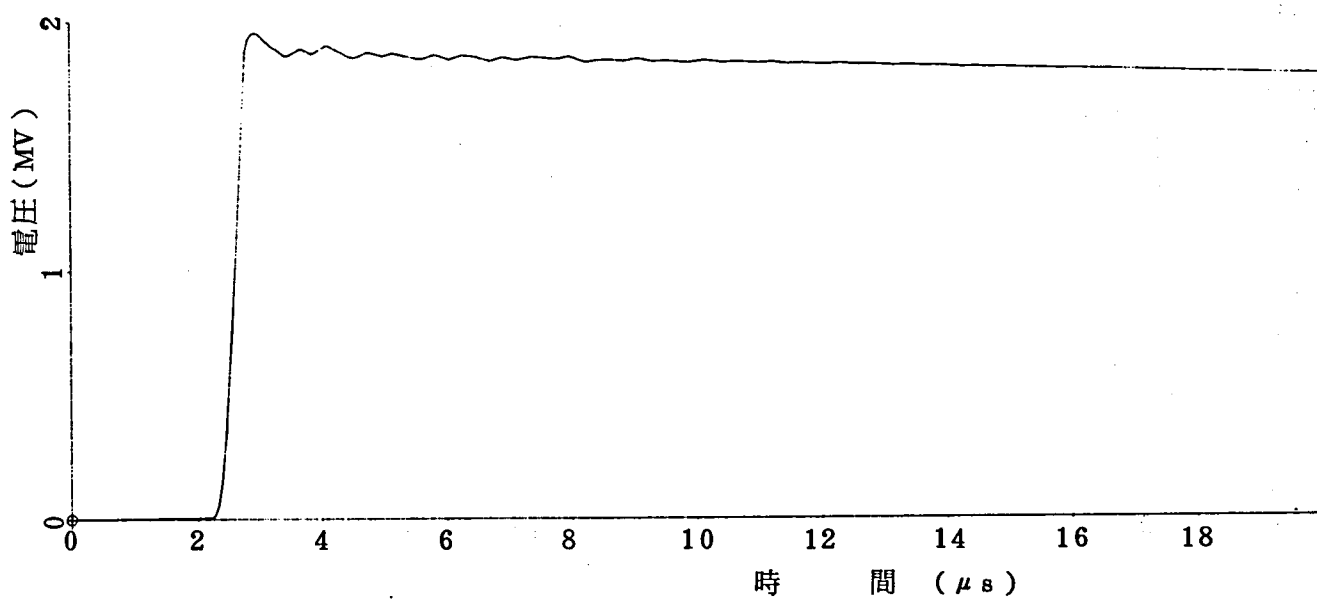
付4-15図(b) ケース  $V_2 - P_{12}$  (GIS入口、変圧器端、母線  $P_{12}$  に避雷器を設置)

—線路用しゃ断器線路端の電位—



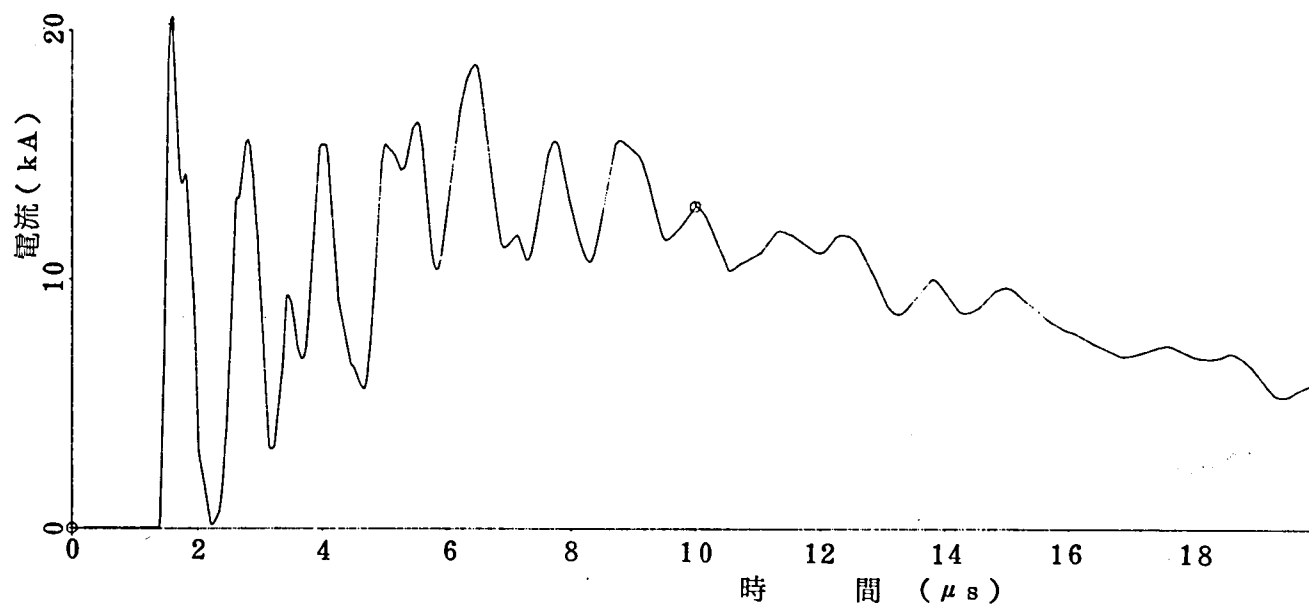
付4-15図(c) ケース $V_2 - P_{12}$  (GIS入口、変圧器端、母線 $P_{12}$ に避雷器を設置)

—母線区分断路器開放端の電位—



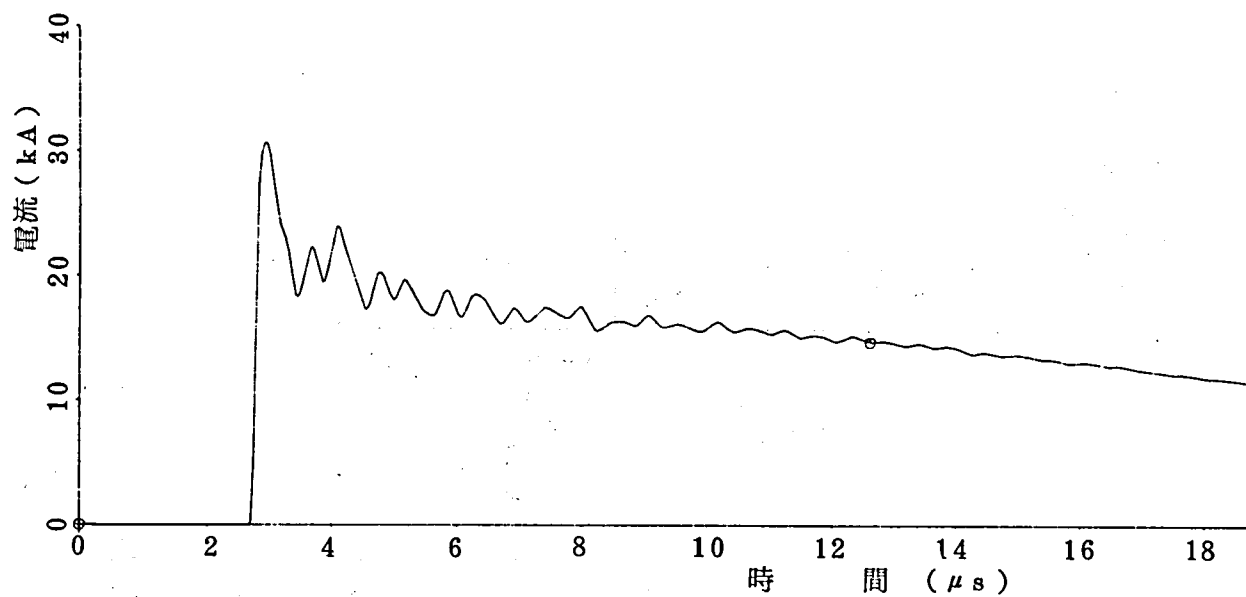
付4-15図(d) ケース $V_2 - P_{12}$  (GIS入口、変圧器端、母線 $P_{12}$ に避雷器を設置)

—変圧器端の電位—



付4-15図(e) ケース $V_2 - P_{12}$  (GIS入口、変圧器端、母線 $P_{12}$ に避雷器を設置)

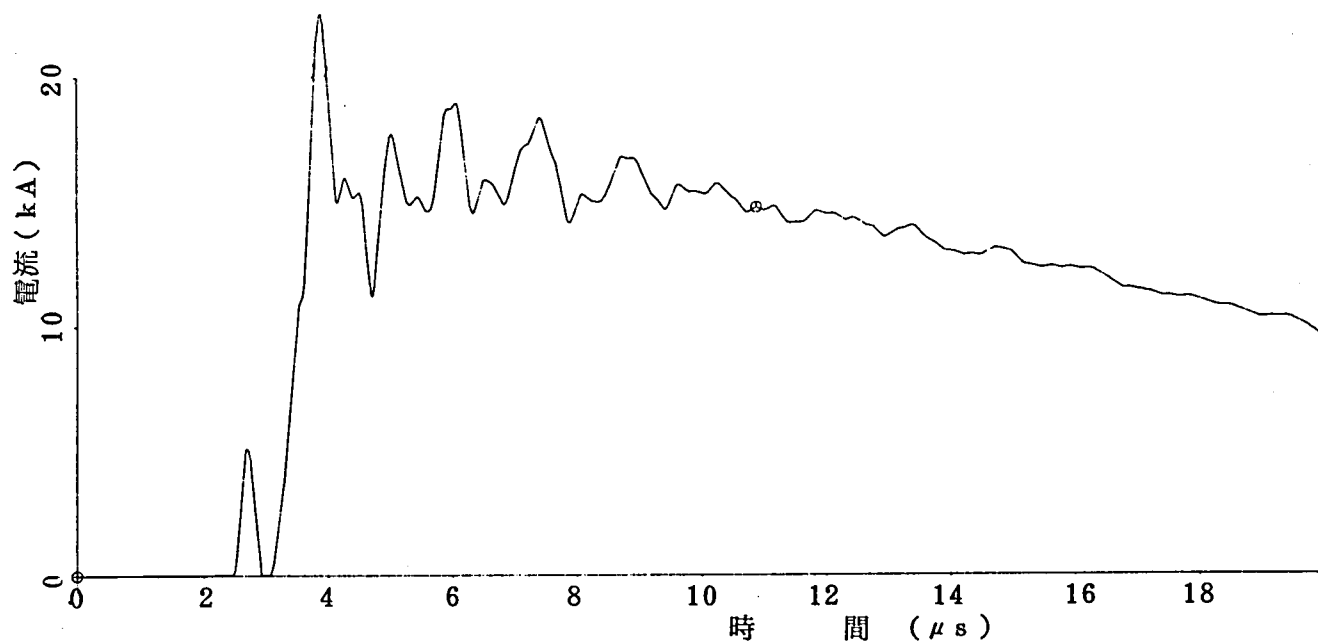
—GIS入口の避雷器の電流波形—



付4-15図(f) ケース $V_2 - P_{12}$  (GIS入口、変圧器端、母線 $P_{12}$ に避雷器を設置)

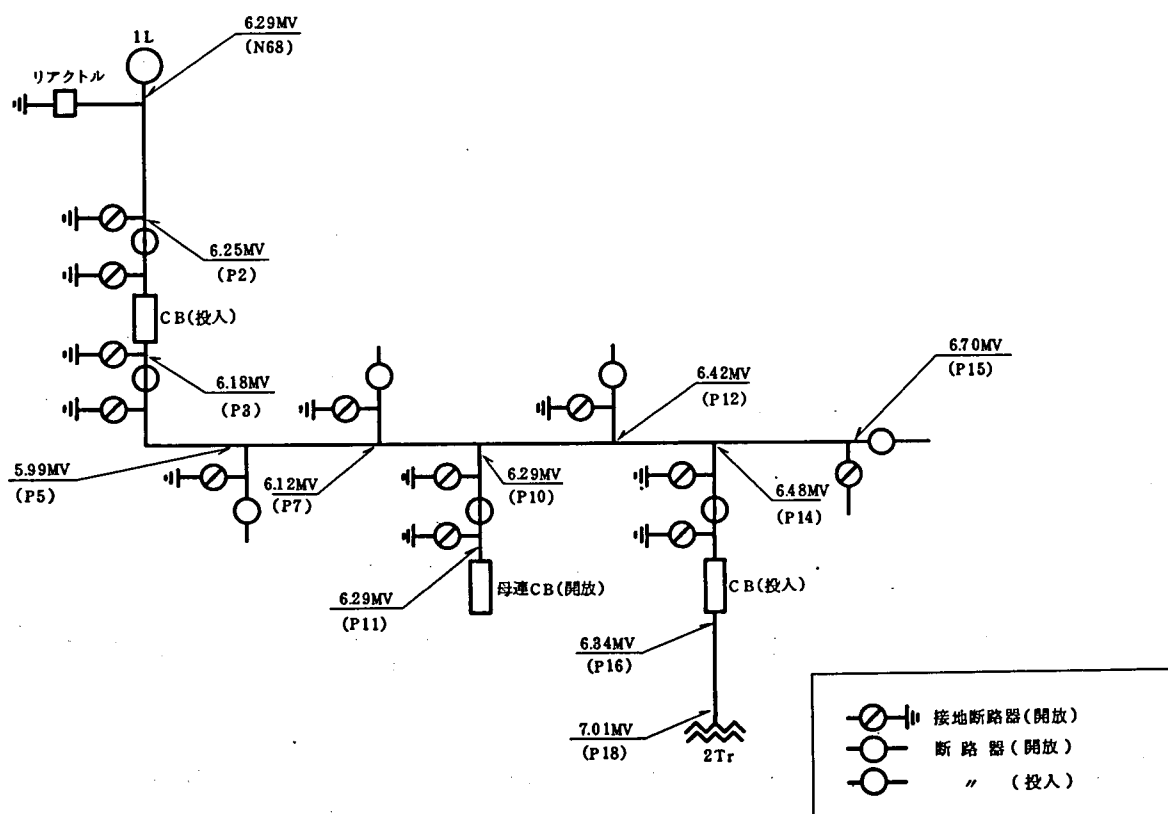
—変圧器端避雷器の電流波形—



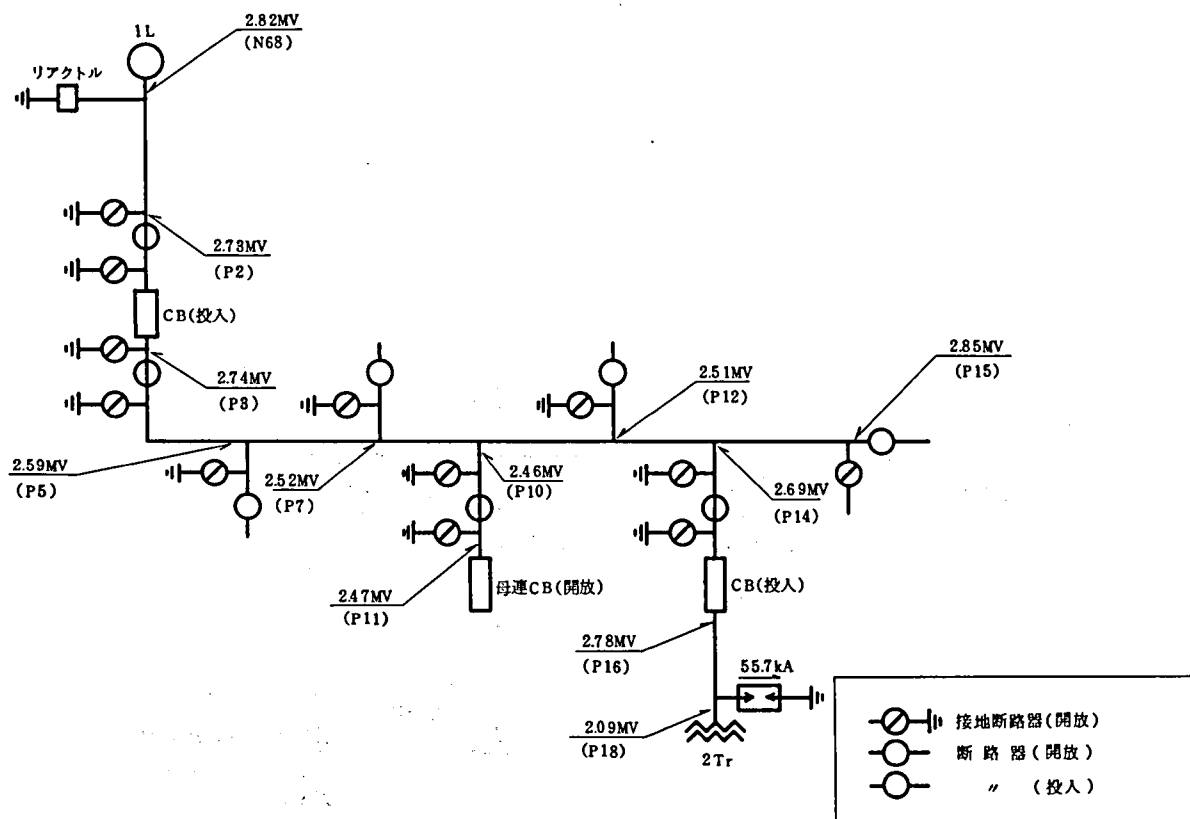


付4-15図(g) ケースV<sub>2</sub>-P<sub>12</sub> (GIS入口、変圧器端、母線P<sub>12</sub>に避雷器を設置)

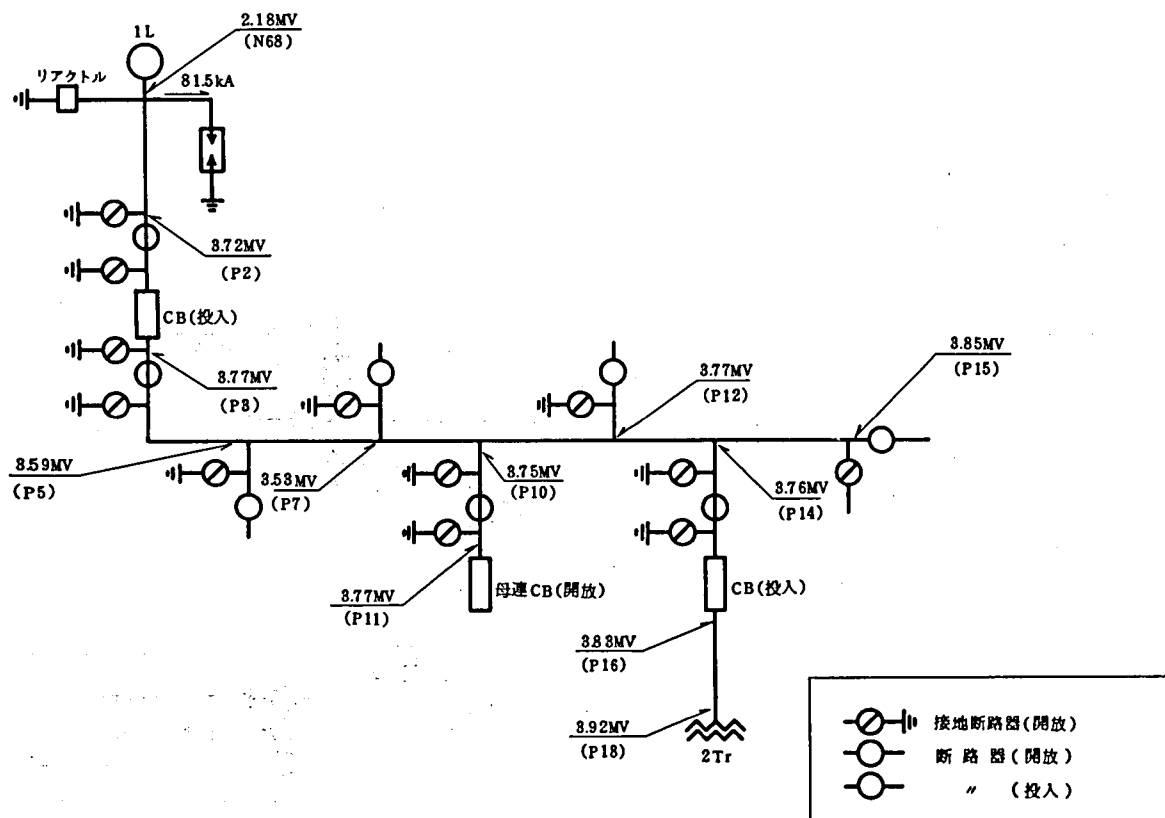
—母線P<sub>12</sub>避雷器の電流波形—



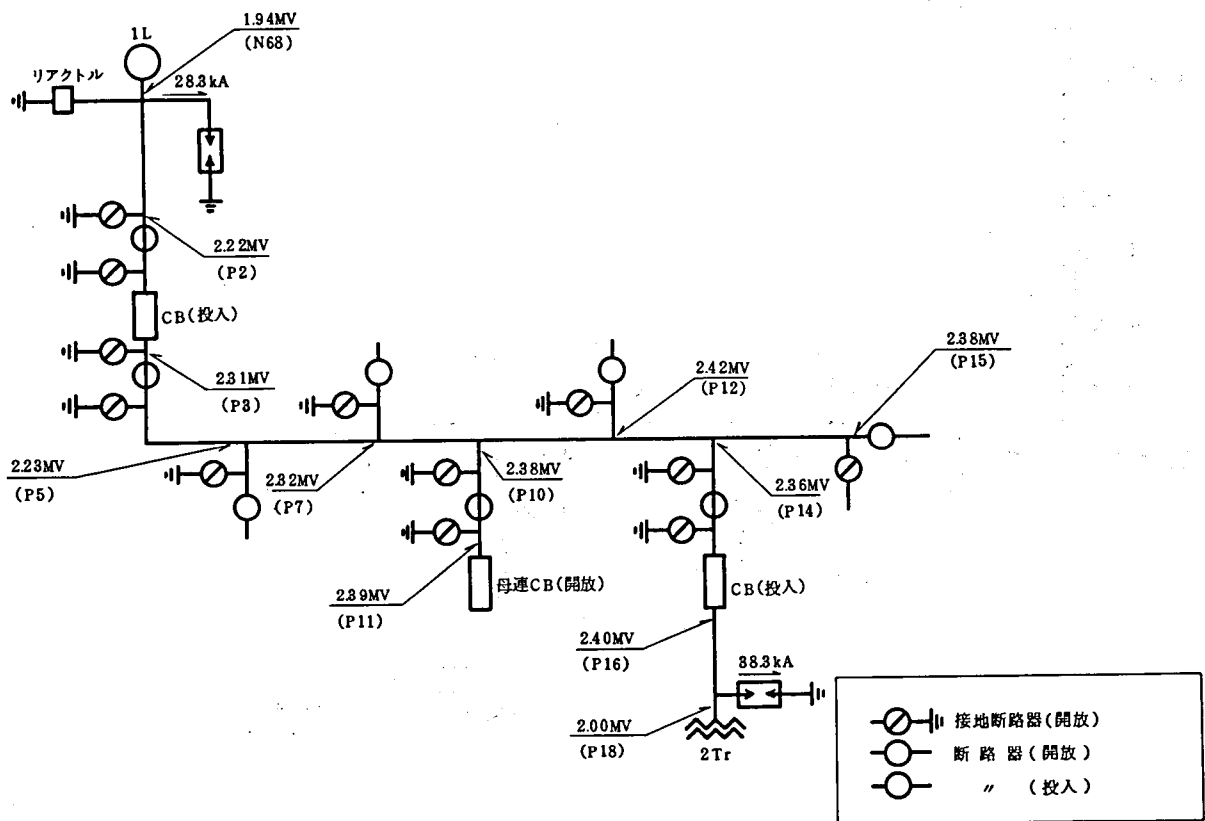
付4-16図 各節点の電圧ピーク値 ケースI<sub>2</sub>



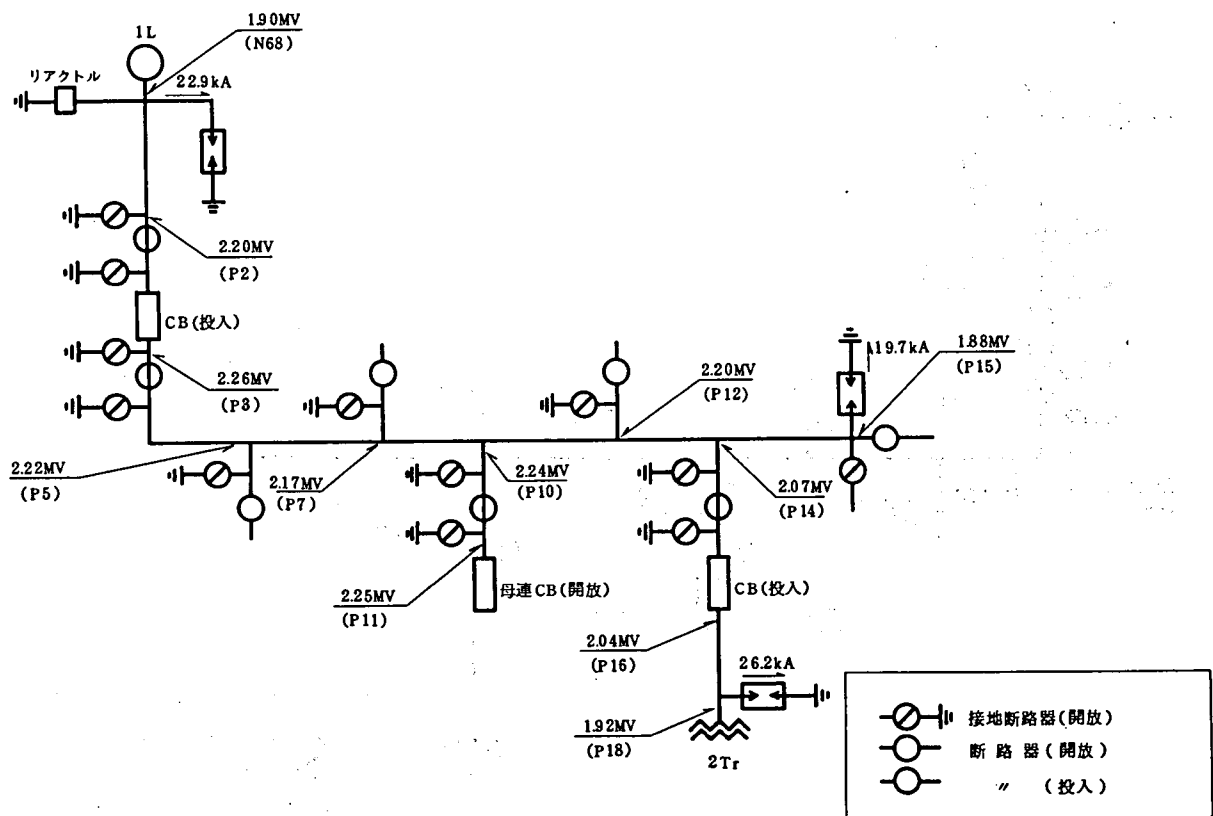
付 4 - 17 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース II<sub>2</sub>



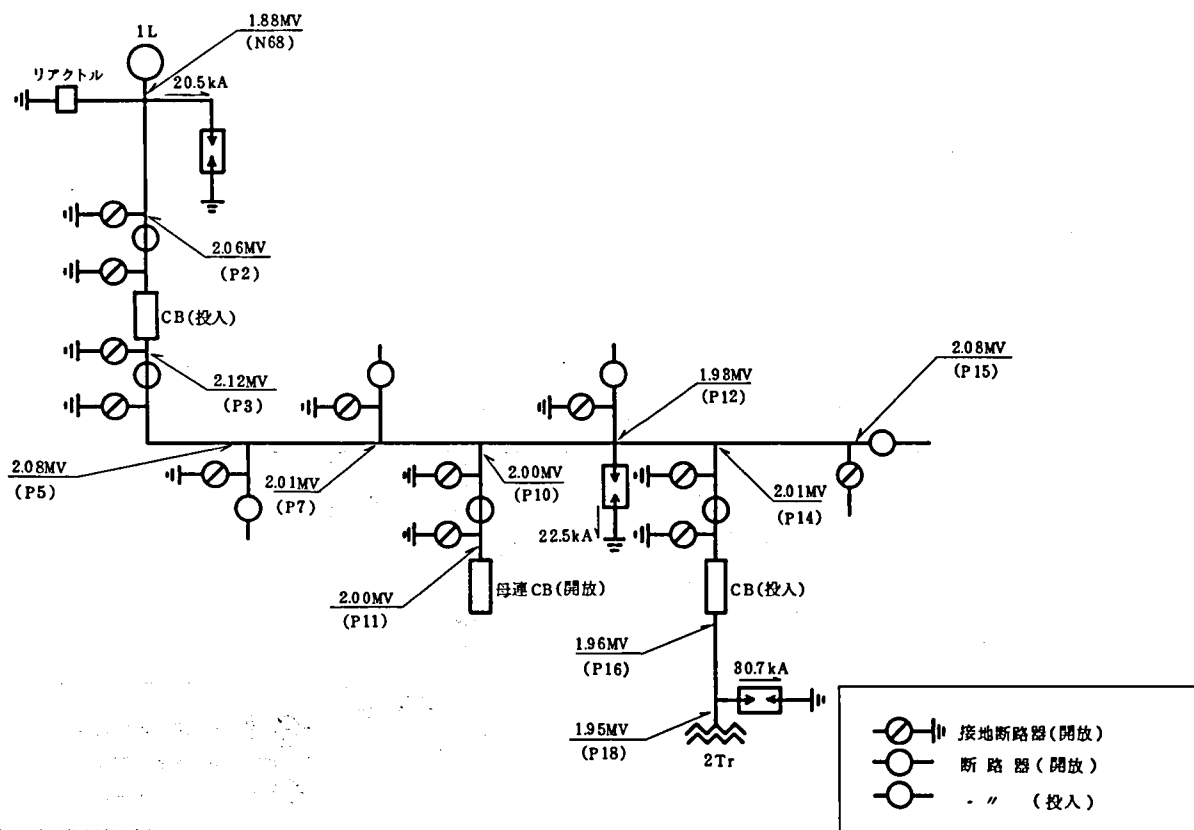
付 4 - 18 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース III<sub>2</sub>



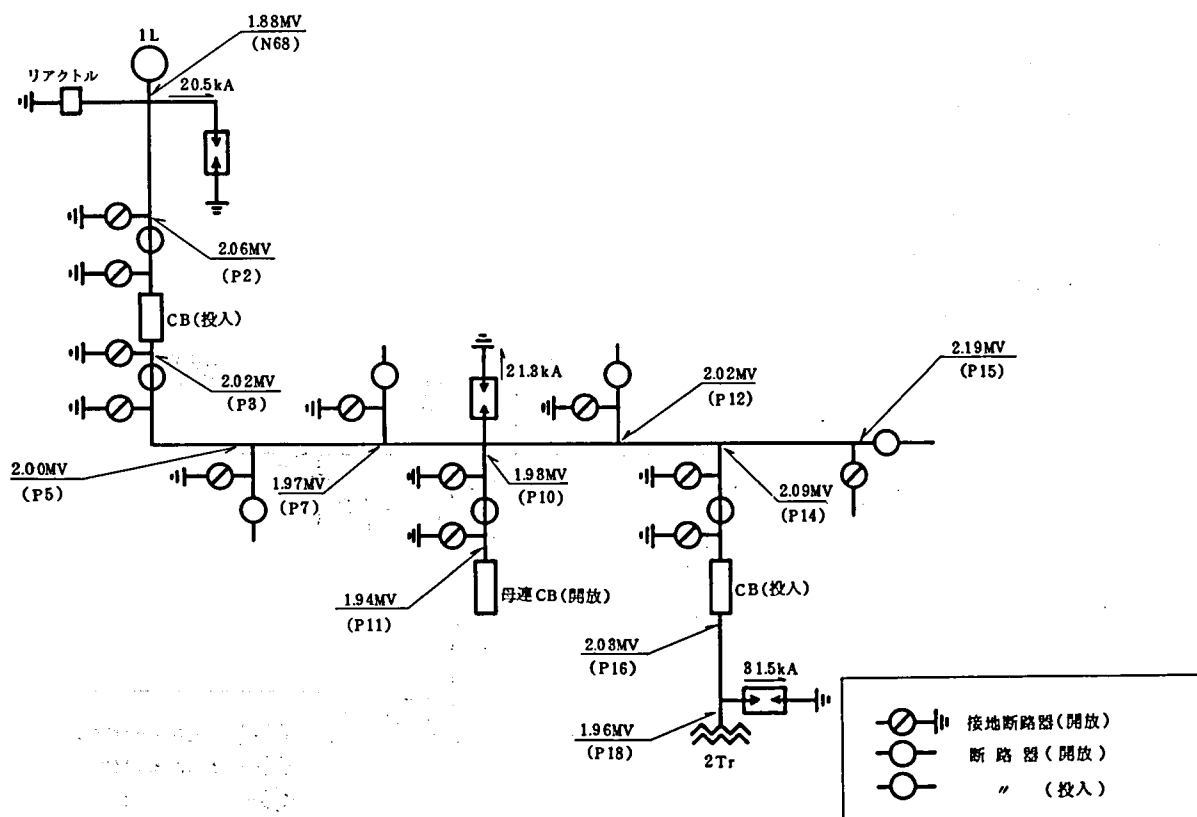
付 4-19 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V_2$



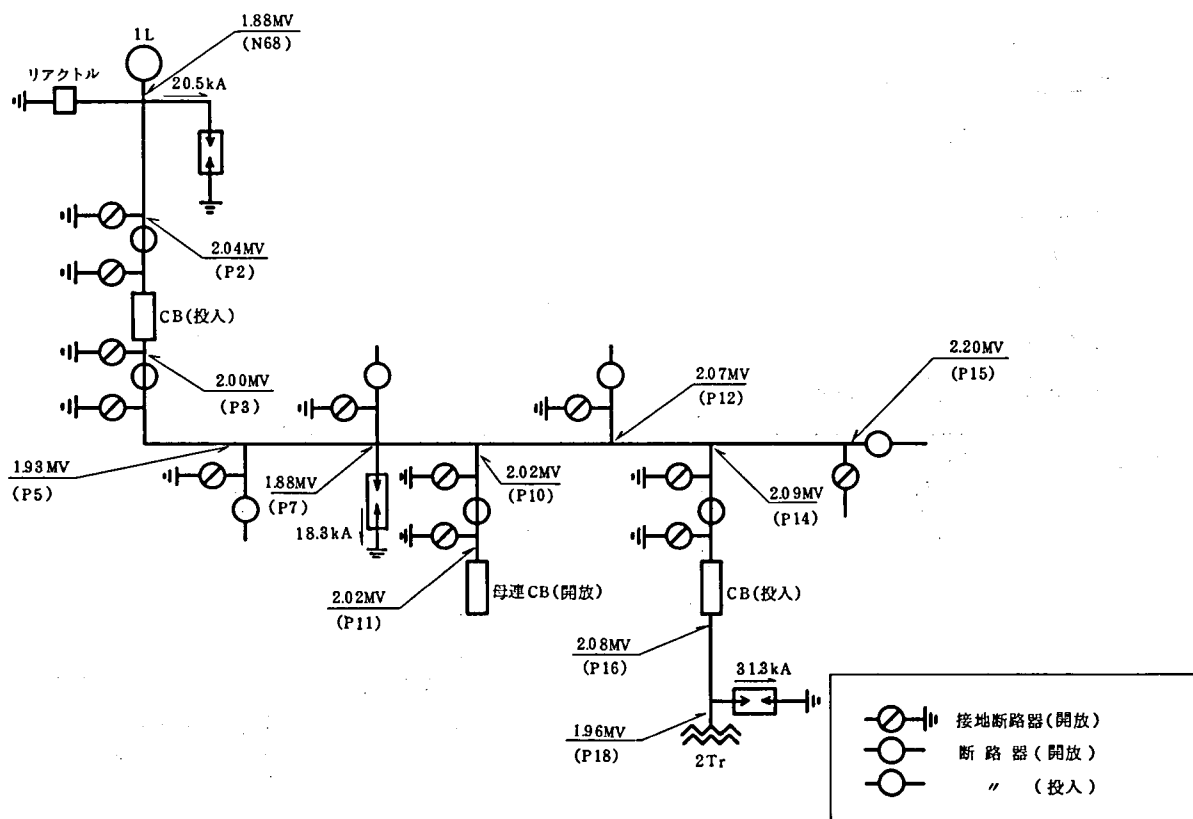
付 4-20 図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V_2$ -P15



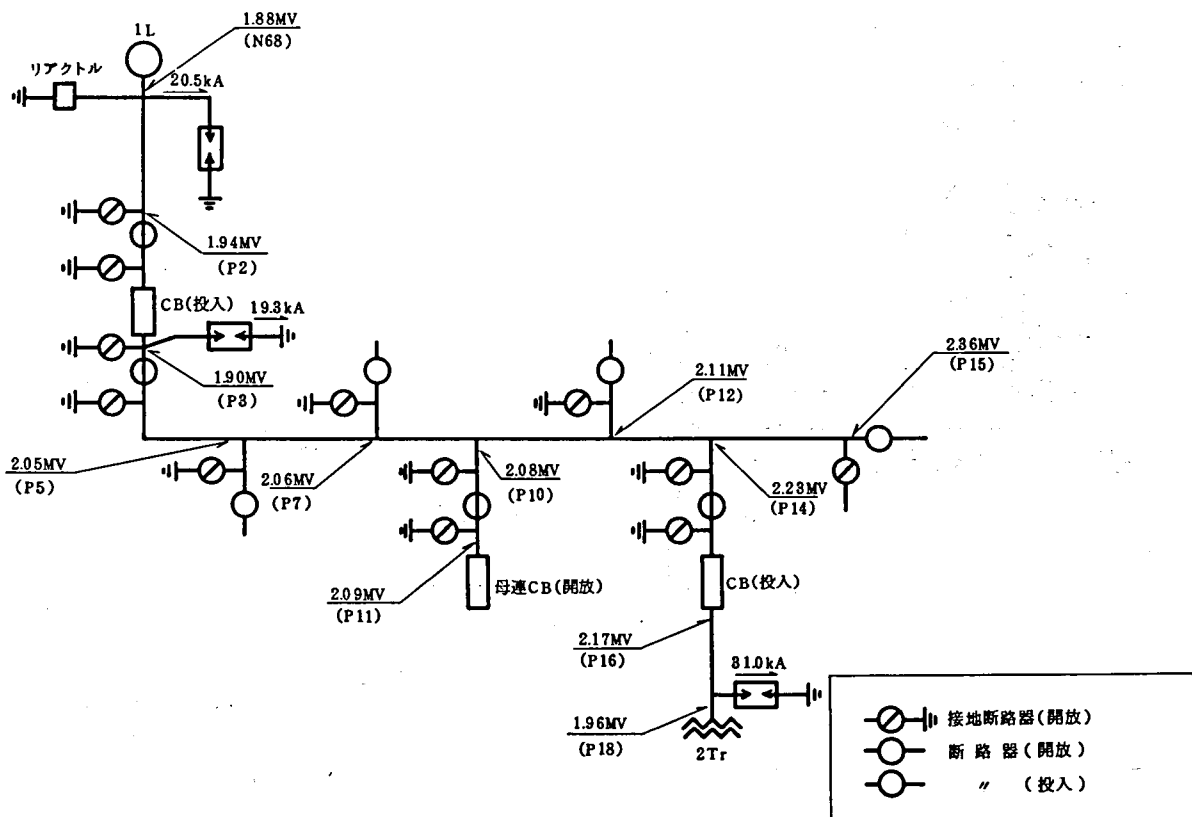
付4-2.1図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V_2 - P_{12}$



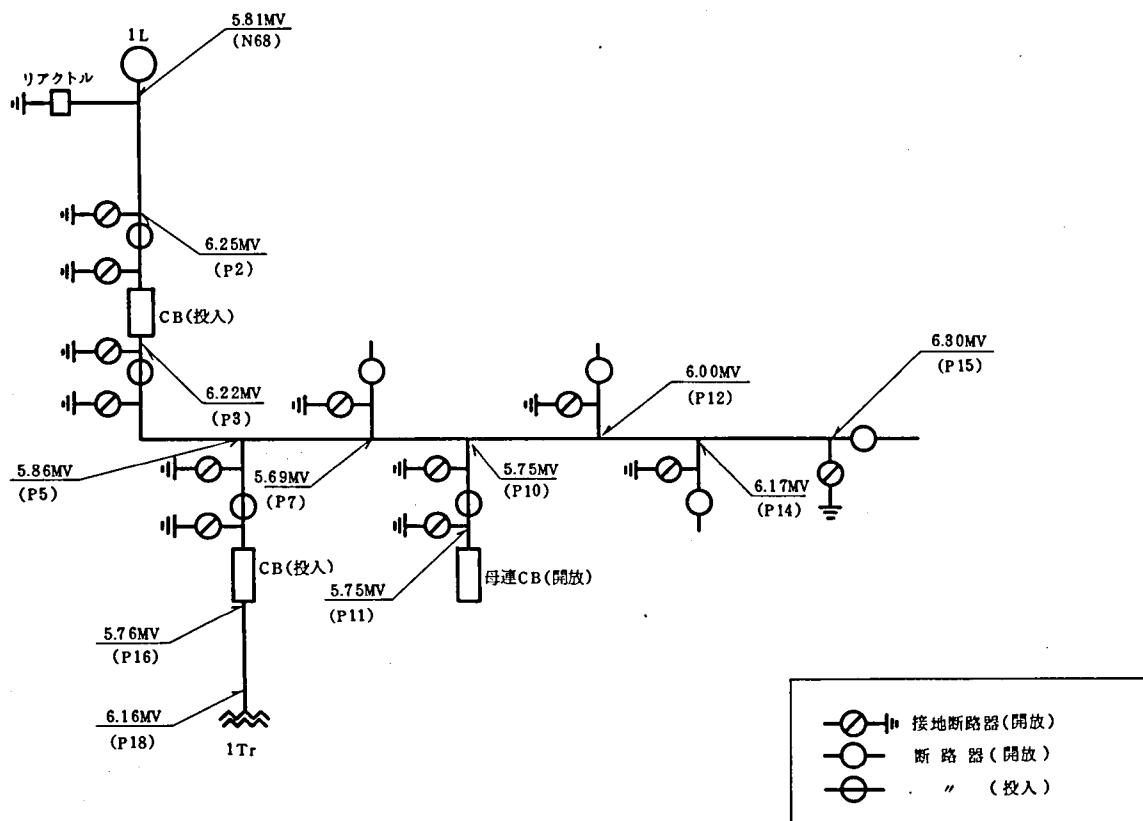
付4-2.2図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V_2 - P_{10}$



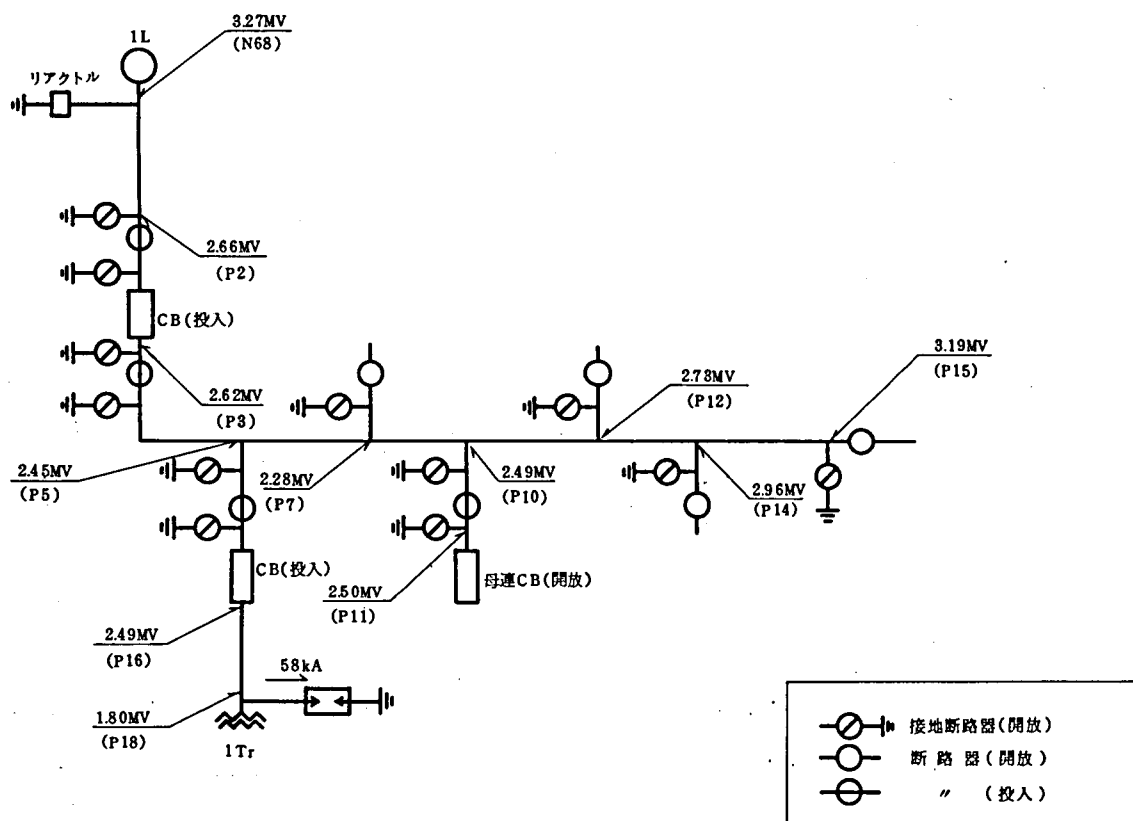
付4-23図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V_2-P_7$



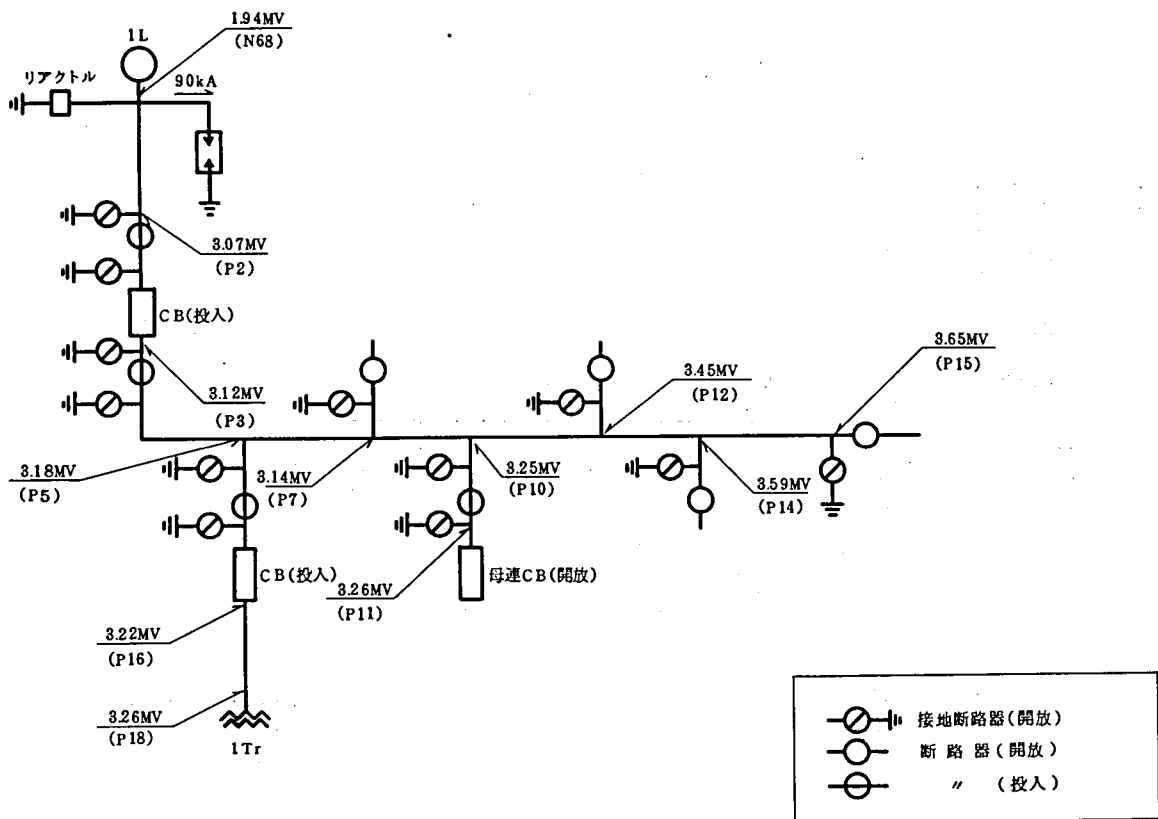
付4-24図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V_2-P_3$



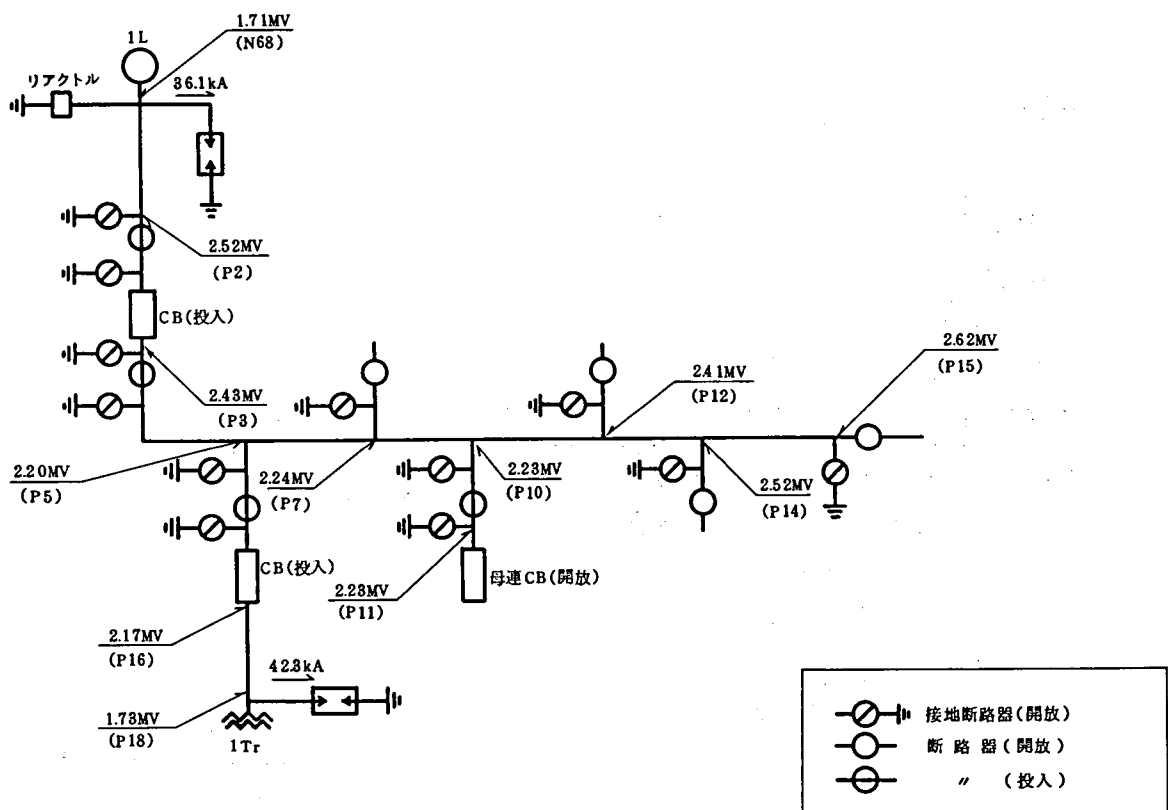
付4-25図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース I<sub>1</sub>



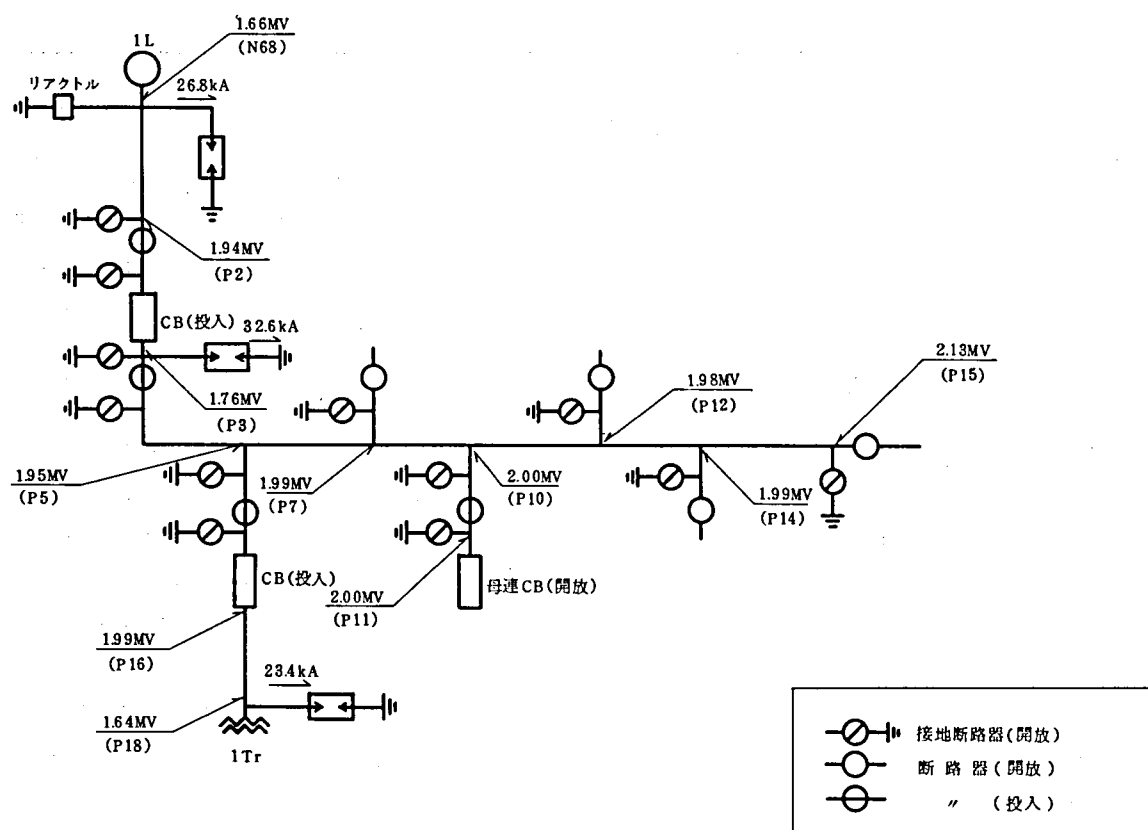
付4-26図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース I<sub>1</sub>'



付4-27図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケースⅢ<sub>1</sub>



付4-28図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケースⅣ<sub>1</sub>



付4-29図 各節点の電圧ピーク値と避雷器に流れる電流ピーク値 ケース  $V'_1-P_3$



## 付録 5

## G I S の サージ伝搬特性の具体例

| 定格電圧<br>(kV) | サージインピーダンス<br>( $\Omega$ ) | 伝搬速度<br>(m/ $\mu$ S)                         | 母線形状                   | 備 考                              |
|--------------|----------------------------|----------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 500          | (46)                       | (242)                                        | 単 相                    | 実測値 関電大飯<br>(測定時浮遊容量の付加あり)       |
| 500          | 69                         | 295                                          | 単 相 32m                | 〃 〃 関電奥多々良木、<br>改良形長尺母線          |
| 500          | $Z_0 = 105$<br>$Z_1 = 45$  | $V_0 = 228 \sim 234$<br>$V_1 = 208 \sim 214$ | 3相230/1100mm<br>長さ 55m | 〃 実測のL、Cより計算                     |
| 300          | 70.5                       | 273                                          | 単 相                    | 〃 関電新寝屋川                         |
| 275          | 70                         | 196~207                                      | 3 相                    | 〃 (1相)メーカーB                      |
| 154          | 756~80                     | 217                                          | 単 相 10m                | 〃 関電新生駒                          |
| 84           | 40                         | 250                                          | 単 相                    | 〃 〃 新寝屋川                         |
| 84           | 48                         | 248                                          | 3 相                    | 〃 〃 〃                            |
| 10           | 100                        | 217                                          | 単 相                    | 〃 メーカーD                          |
| 300~765      | 60                         | 300                                          | 単 相                    | 推定値 CIGRE 23-08(1972)<br>Siemens |
| 242          | 73.8                       | 330                                          | 単 相                    | 〃 IEEE T73034-6(1973)<br>W.H.    |
| 245~800      | 60                         | 300                                          | 単 相                    | 〃 CIGRE33-03(1976)<br>ASEA       |
| 123          | 70                         | 290                                          | 単 相                    | 〃 CIGRE33-08(1976)<br>EdF, Delle |
| 1300         | 60                         | 300                                          | 単相330/1100mm           | 計算値W, Boeck 他                    |
| 725~765      | 73.8                       | 300                                          | 単 相                    | 〃 H,W, Andel 他                   |
| 138~500      | 54.1~57.2                  | 258~278                                      | 単 相                    | 〃 メーカーE(アメリカ)                    |
| 66~500       | 53~64                      | 300                                          | 単 相                    | 〃 メーカーC                          |

付録6 S F<sub>6</sub> ガスの特性とGISの絶縁設計について

1. S F<sub>6</sub> ガスの物理特性

S F<sub>6</sub>ガスは空気の5倍の重さを持ち、大気圧では-63.8(℃)で昇華し、2.3気圧-50.8(℃)で融点が確認されている。また、密度は0(℃)で6.6(g/ℓ)である。S F<sub>6</sub>ガスの物理特性を示すと付6-1表となる。

付6-1表 S F<sub>6</sub>ガスの主要物理特性

| 分 子 式                 | S F <sub>6</sub>                                     |
|-----------------------|------------------------------------------------------|
| 分 子 量                 | 146.06                                               |
| 融 点                   | -50.8℃                                               |
| 昇 華 点                 | -63.8℃                                               |
| 密 度                   | 6.139 g/ℓ (20℃ 760mmHg)                              |
| 臨 界 定 数 温 度           | 45.64℃                                               |
| 圧 力                   | 37.18 atm                                            |
| 密 度                   | 0.725 g/ml                                           |
| 融 解 熱                 | 1201 cal/g·mole                                      |
| 蒸 発 熱                 | 2198 cal/g·mole (20℃)                                |
| 昇 華 熱                 | 5640 cal/g·mole                                      |
| 熱 伝 導 率               | $3.36 \times 10^{-5}$ cal/cm·sec℃ (20℃)              |
| 比 熱 Cp                | 13.94 cal/mole·℃ (100°K, 固体)                         |
|                       | 28.50 " (230°K, 液体)                                  |
|                       | 0.154 " (300°K, 気体 1atm)                             |
| 粘 性 係 数 $\eta$        | 0.0157 centi poises (気体 1atm 31.16℃)                 |
|                       | 0.305 " " (液体 13.52℃)                                |
| 光 の 屈 折 率             | 1.000783 (0℃, 1atm)                                  |
| 表 面 張 力               | 8.02 dyne/cm (-20℃)                                  |
| 音 速                   | 137.4 m/sec (38℃, 1.36 atm)                          |
| 飽 和 蒸 気 圧             | 3.56 atm (-40℃)                                      |
|                       | 7.16 " (-20℃)                                        |
|                       | 13.04 " (0℃)                                         |
|                       | 21.85 " (20℃)                                        |
|                       | 34.21 " (40℃)                                        |
| 比 誘 電 率 $\epsilon_s$  | 1.002049 (1atm 25℃)                                  |
| 誘 電 正 接 $\tan \delta$ | $2 \times 10^{-7}$ 以下 (1atm)                         |
| 油 対 する 可 溶 性          | 0.408 ml, Gas (STP) / ml oil (27℃)                   |
| 水 対 する 可 溶 性          | $5.45 \times 10^{-3}$ ml, Gas (STP) / ml water (25℃) |

## 2. SF<sub>6</sub>ガスの平等電界中の絶縁破壊特性

SF<sub>6</sub>ガスの絶縁耐力および消弧能力が空気に比して高いのは自由電子がSF<sub>6</sub>分子に付着するためであり、この電子付着によって通常SF<sub>6</sub><sup>-</sup>およびSF<sub>5</sub><sup>-</sup>イオンが発生する。従って、

電子の第1衝突

突電離係数  $\alpha$

(1/cm) が

付着係数  $\eta$  (

1/cm) をわ

ずかに超える

ことにより電

子なだれ現象

を生じ、絶縁

破壊を起こす

に至る。付6

-1図はこの

関係を示した

もので、SF<sub>6</sub>

ガス圧力 1 (

kg/cm<sup>2</sup>) のも

とにおける絶

縁破壊の限界

は 86.1 (KV/cm)

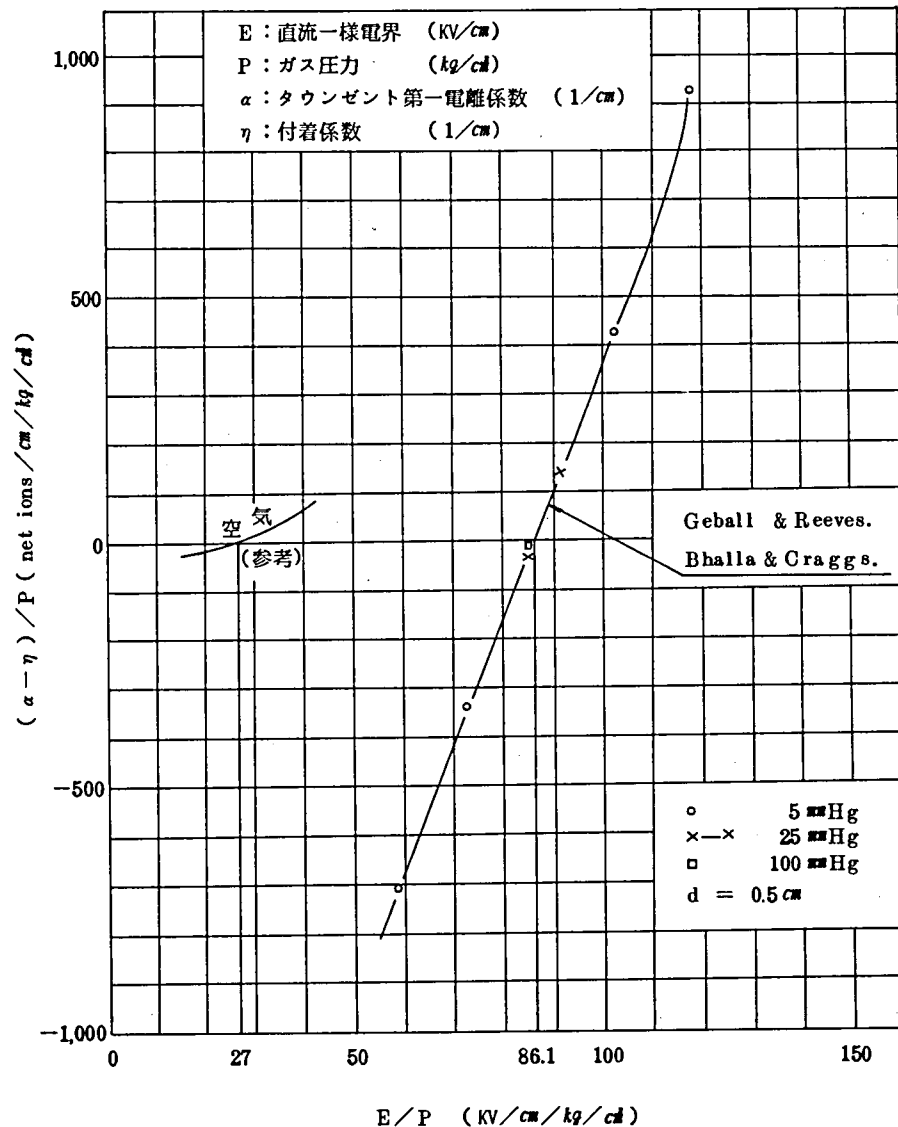
で示される。

ここでSF<sub>6</sub>ガ

ス圧力 1 (kg/cm<sup>2</sup>) と 1 気圧との関係は次のとおりである。

$$86.1 \text{ (KV/cm) at } 1 \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 89 \text{ (KV/cm) at } 1 \text{ (atm)}$$

$$1 \text{ (atm)} = 760 \text{ (mm Hg)} = 1.0332 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$



付6-1図 SF<sub>6</sub>ガスの  $(\alpha - \eta) / P$  と  $E / P$  の関係

### 3. GIS絶縁設計の例

GIS母線のような単相形同心円筒電極系のSF<sub>6</sub>ガス絶縁設計例をあげると付6-2表のようになる。

付6-2表 電氣的ストレスと耐電圧値の比較

| 公称<br>電圧<br>KV | 容器<br>内径<br>mm | 導体<br>外径<br>mm | 不平等<br>率 | 最低<br>ガス<br>圧力<br>kg/cm <sup>2</sup> | 開閉インパルス<br>耐圧電位傾度<br>KV/mm | 雷インパルス<br>最大電位傾度<br>KV/mm | 線路側<br>雷インパルス値<br>KV |
|----------------|----------------|----------------|----------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|
| 500            | 860            | 240            | 2.1      | 3.0                                  | 15.48                      | 12.19                     | 1,800                |
| 275            | 530            | 170            | 2.1      | 4.0                                  | 18.93                      | 14.70                     | 1,260                |
| 154            | 340            | 85             | 2.2      | 4.0                                  | 18.93                      | 15.53                     | 900                  |
| 77             | 250            | 85             | 1.8      | 4.0                                  | 18.93                      | 10.47                     | 480                  |


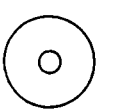
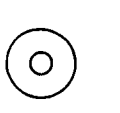
ここで

$$\text{開閉インパルス耐圧電位傾度} = 8.61 \cdot (\text{最低ガス圧力})^{0.7} \div 1.2$$

$$\text{雷インパルス最大電位傾度} = (\text{線路側雷インパルス値}) \times (\text{不平等率}) \div (\text{容器内径} - \text{導体外径}) \div 2$$

付6-2表から明らかなように、開閉インパルスによるよりも雷インパルスに対する電氣的ストレスの方が強いので、GISの絶縁設計はLIWLによって定まることとなる。

500KV、4KA用GISの母線径に例をとると、現行のLIWL1800KVのものを基準にして、LIWLを1550KV、1300KVに低減したときの母線径は付6-3図のように大巾に縮小することができる。従って、GIS変電所の経済設計は十分低い保護レベルのZnO避雷器を最適位置に配置することによってGISのLIWLを極力低減することが一つの基礎となる。

|          |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|          |  |  |  |
| LIWL(kV) | 1,800                                                                                | 1,550                                                                                 | 1,300                                                                                 |
| D(φ)     | 100                                                                                  | 73                                                                                    | 61                                                                                    |

付6-3図 LIWLによる500KVGIS母線径の比較

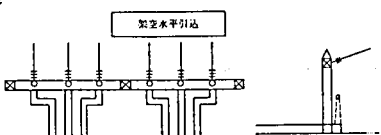
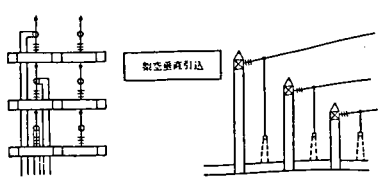
## 付録7

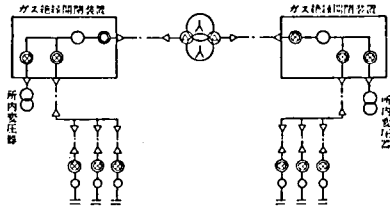
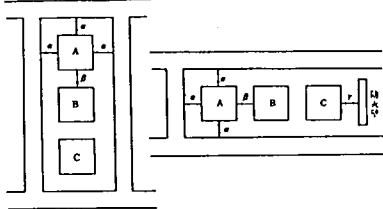
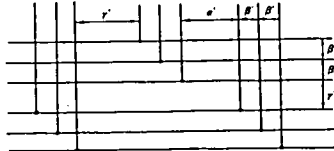
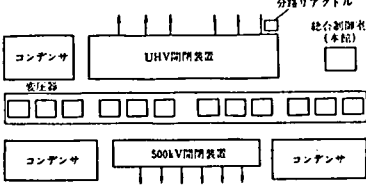
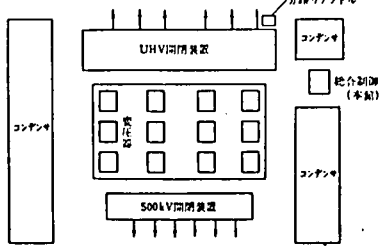
## UHVGIS変電所の概念設計例

筆者が副部長として参画しているUHV送電特別委員会機器部会においてとりまとめたUHV変電所の概念設計から1200KV変電所のうち、本論文に関する事項を簡単に述べる。

1. 設計条件 変電所概念設計にあたっての設計条件は付7-1表のとおりとした。

付7-1表 変電所概念設計にあたっての設計条件

| 項 目                                                          | 設 計 条 件                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 系統最高電圧                                                    | 1200KV                                                                                                                                                                                                             |
| 2. 規 模                                                       | UHV送電線：6 cct, 500KV送電線：6 cct,<br>変圧器：4バンク                                                                                                                                                                          |
| 3. 送電線引込<br>(UHV)<br><br><br><br><br><br><br><br><br>(500KV) | 架空引込<br><br>(注) 引込口相間距離は20mとした。<br><br>架空引込 |
| 4. 母 線 方 式                                                   | 2重母線4ブスタイ(UHV側, 500KV側とも)<br>または、1 1/2 CB方式(UHV側, 500KV側とも)                                                                                                                                                        |
| 5. 短 絡 電 流                                                   | UHV側, 500KV側とも：50KA(63KA)                                                                                                                                                                                          |
| 6. 変 圧 器                                                     | 1,150KV/525KV, 3,000MVA                                                                                                                                                                                            |
| 7. 開 閉 設 備                                                   | 母 線 UHV側, 500KV側とも：12KA<br>送電線 UHV側, 500KV側とも：12KA<br>バンク UHV側, 500KV側とも：4KA                                                                                                                                       |
| 8. 分 路<br>リアクトル                                              | 1,200KV 450MVA/回線(単相器)                                                                                                                                                                                             |

| 項 目                           | 設 計 条 件                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9. 調 相 設 備                    | <p>電力用コンデンサ(変圧器3次)<br/> <math>720\text{MVA}(120\text{MVA}\times 6)/\text{バンク}</math> 大容量密閉形</p>                                                                                                                        |
| 10. 監視制御方式                    | 集中監視制御方式 総合制御室(本館-変電所入口付近)                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 11. 通 信 方 式                   | マイクロ波伝送方式 100m程度のマイクロタワー                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 12. 所 内 設 備                   | 変圧器周辺に500KV変電所程度の所内変圧器、所内キュービクルのスペースを確保する。                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 13. 構内運搬道路                    | <p>変圧器運搬道路 巾10m</p> <p>外 周 巾10m</p>                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 14. 変圧器および<br>開閉装置の組<br>立スペース | <p>(a) 変 圧 器</p>  <p>(b) 開閉装置</p>  <p>(注) 機器据付、保守上支障がないように、<math>\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'</math>を決める。</p> |
| 15. レイアウト                     | <p>変圧器横配列案</p>  <p>変圧器縦配列案</p>                                                                                                   |

また、設計に際し留意した事項を付 7 - 2 表に示した。

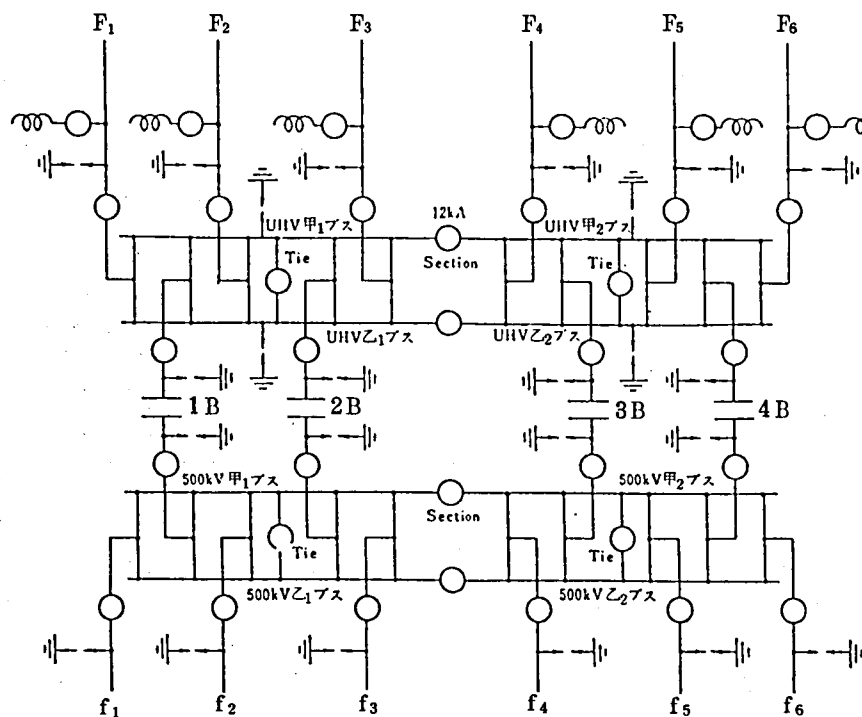
## 2. 概念設計結果のうち、変電所の所要面積、GIS の総母線長

概念設計の結果、変電所の所要面積、GIS の総母線長はそれぞれ約 13 ～ 20 万 m<sup>2</sup>、4600 ～ 5700 m であるが、これらには母線方式と変圧器配列方法が影響し、付 7 - 1 図(1)に単線結線図を示す 2 重母線 4 ブスタイ方式の方が、付 7 - 1 図(2)の 1  $\frac{1}{2}$  CB 方式より所要面積にして約 20 %、総母線長で約 30 % 少なくなり得ることが判明した。

いずれの母線方式を採用するかについては、実設計にあたって経済性のみならず系統条件運転保守、信頼度、事故対応等の面を含めて決定する必要があるが、本論文では一応経済的に有利と考えられる 2 重母線 4 ブスタイ方式を選び検討対象とすることとした。また、変圧器配列についても横配列案の方が有利となったので、横配列とした。

付 7 - 2 表 設計に際し留意した事項

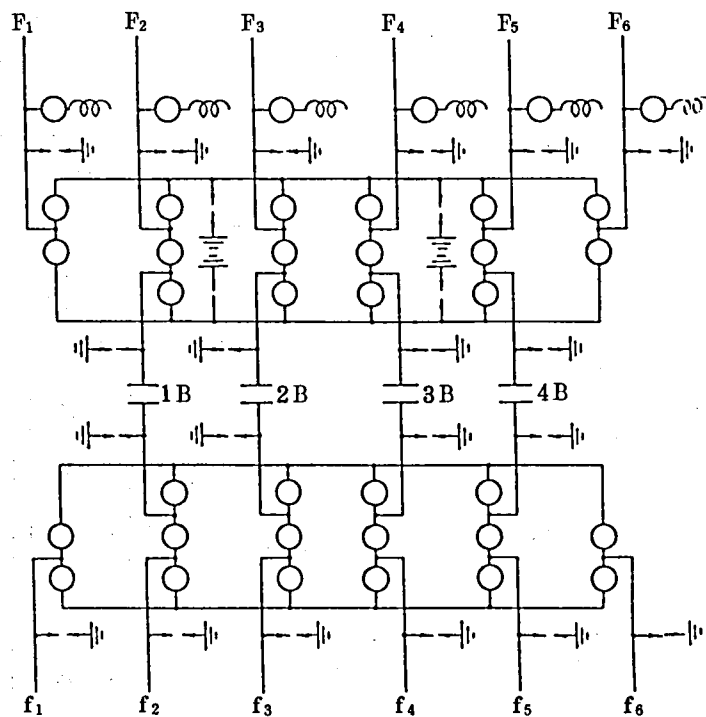
|                    | 高信頼度                                                                                                                           | 安全・防災                                                                                      | 周囲環境との調和        | 縮小化     | 運転保守の便             | 工事施工の容易性                                                                                                                     | 経 済 性            |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 引 込 口              |                                                                                                                                | 静電誘導防止<br>ブッシング耐震性                                                                         | 低プロフィール         | 線路幅の縮小  |                    |                                                                                                                              | 母線長さ<br>ブッシング長さ  |
| 分路リアクトル<br>(線 路 側) | 单相器<br>シャ断器あり                                                                                                                  |                                                                                            | 騒音              |         |                    | 組立てスペース                                                                                                                      |                  |
| 開 閉 装 置            | <ul style="list-style-type: none"> <li>母線事故が発生しにくい。</li> <li>全停とならない。</li> <li>送電線工事に適応する。</li> <li>工事中的変則運用に対応できる。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>充電部のいんべい化</li> <li>接地取付の容易さ</li> <li>耐震性</li> </ul> |                 | スペースの縮小 | シャ断器の点検が可能(定位置)巡視可 | <ul style="list-style-type: none"> <li>増設可能(隣接回線を停止せずに)</li> <li>基礎は分割(2～4回線毎)</li> <li>故障部分の取替が容易(他の部分、回線に影響しない)</li> </ul> | 母線長さ<br>(接続母線含む) |
| 変 圧 器              | 変圧器間の接続が高信頼度(三次回路を含む)                                                                                                          | 油流出防止対策<br>類焼防止対策                                                                          | 騒音              |         |                    | 組立てスペース                                                                                                                      |                  |
| 調 相 設 備            |                                                                                                                                | 密閉化                                                                                        | 騒音              | 大容量縮小形  |                    | 増設が容易                                                                                                                        |                  |
| 総合制御室<br>マイクロタワー   |                                                                                                                                |                                                                                            | マイクロタワー高さ 100 m |         | 位置                 |                                                                                                                              |                  |
| そ の 他              |                                                                                                                                | 設備と境界の隔離の確保、<br>調整地の設置                                                                     |                 |         |                    |                                                                                                                              |                  |



(a) 2重母線4ブスタイ方式

付7-1図(1) UHV変電所単線図

(UHV. 500KV送電線; 6 cct, 変圧器; 4バンク)



(b) 1 1/2 CB 方式

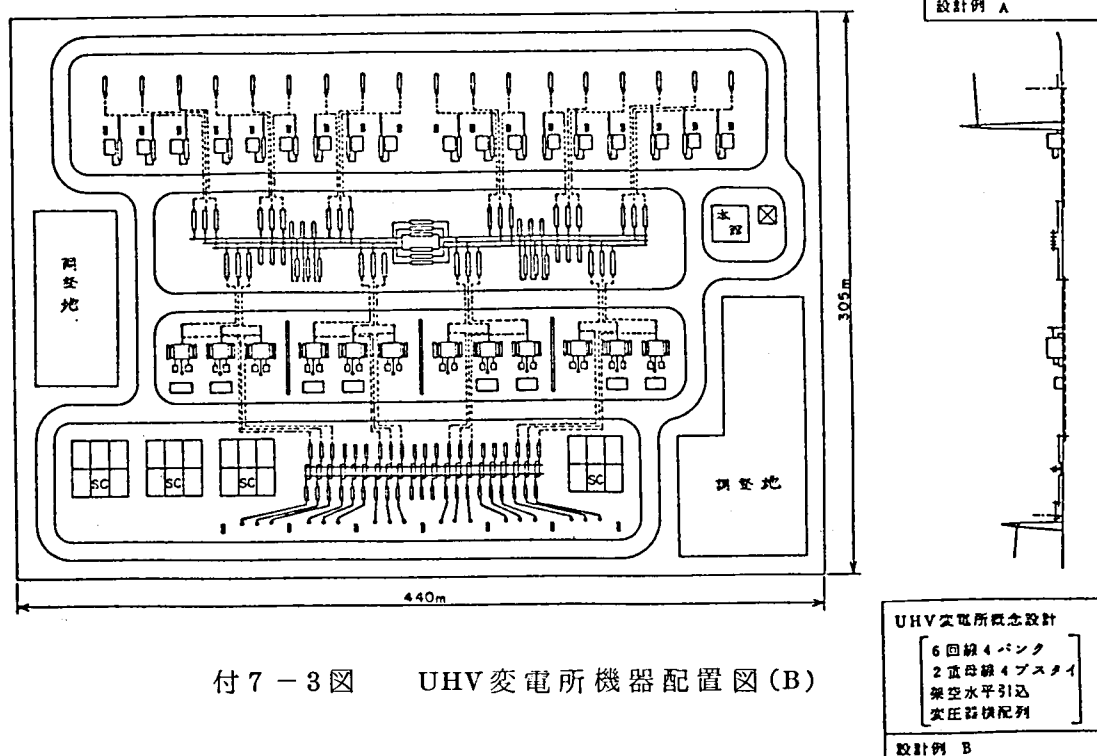
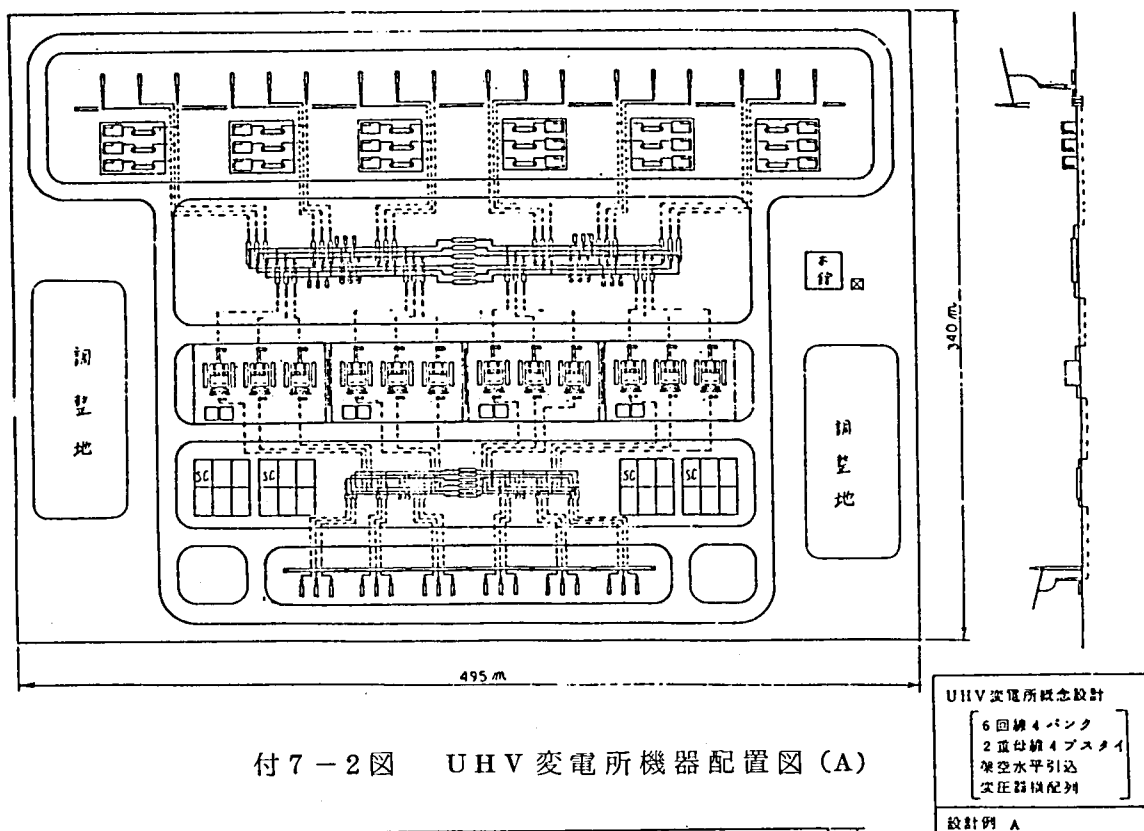
付7-1図(2) UHV変電所単線図

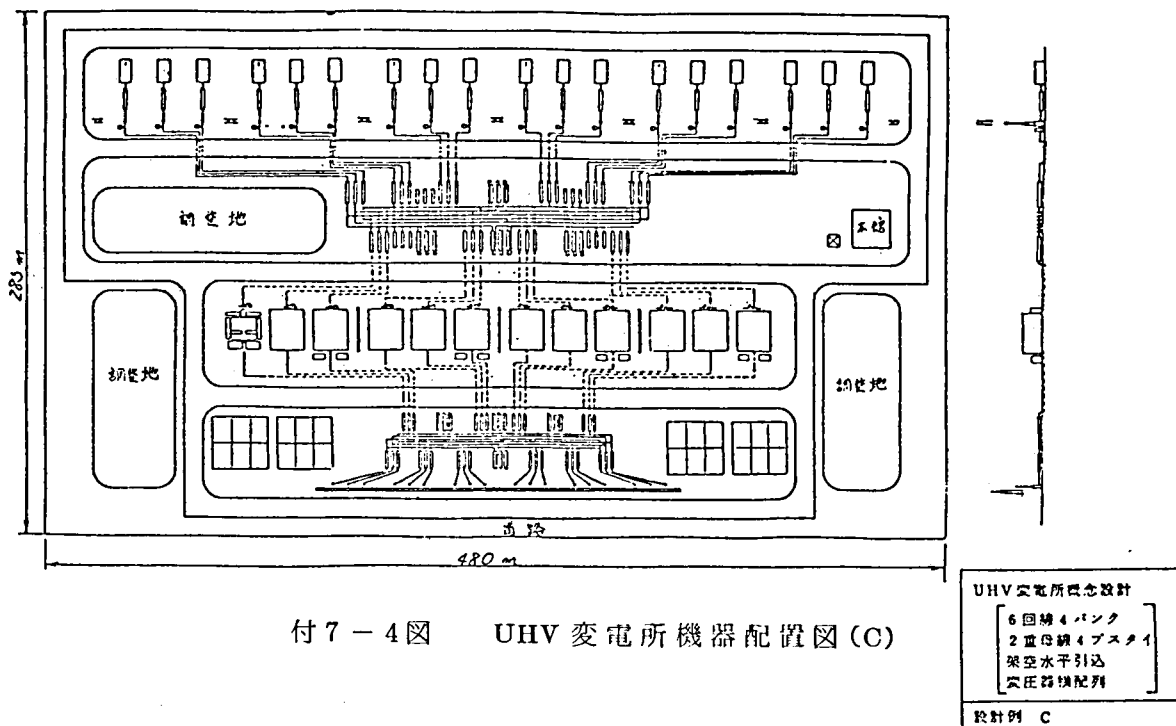
(UHV. 500KV送電線; 6 cct, 変圧器; 4バンク)



### 3. 変電所機器配置案

2重母線4ブスタイ方式、変圧器横配列とした場合の機器配置概念設計結果の例示としては付7-2図～付7-4図があるが、分岐母線をさらに短縮する方が耐雷設計面でも有利になるため、この論文では、これらの配置図に修正を加えて本文の第5章第5.2図に示す配置図とした。





付7-4図 UHV変電所機器配置図(C)

#### 4. 機器の絶縁試験電圧

機器に対する絶縁試験電圧は、機器の経済性と信頼度に大きく影響するので慎重な審議を続けているが、現在検討中の交流短時間試験電圧とインパルス試験電圧の組合せ案を示すと付7-3表のとおりである。

付7-3表  $U_m = 1200 \text{ kV}$ の試験電圧の組合せ案

|   | 交流短時間<br>試験電圧<br>(AC)                                                                                                                                                  | 雷インパルス 開閉インパルス<br>試験電圧 試験電圧<br>(LIWL) (SIWL) |                                         |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
| 1 | $1640 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} = 2318 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} \times 1.1 = 2550 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} \times 1.2 = 2783 \text{ kV}$<br>+長時間試験 | $2900 \text{ kV}$ , $2400 \text{ kV}$ ㉑      | $2700 \text{ kV}$ , $2250 \text{ kV}$ ㉒ |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
| 2 | $1390 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} = 1966 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} \times 1.1 = 2162 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} \times 1.2 = 2359 \text{ kV}$<br>+長時間試験 | $2550 \text{ kV}$ , $2100 \text{ kV}$ ㉓      | $2400 \text{ kV}$ , $1950 \text{ kV}$ ㉔ |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
| 3 | $1200 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} = 1697 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} \times 1.1 = 1866 \text{ kV}$<br>$\times \sqrt{2} \times 1.2 = 2036 \text{ kV}$<br>+長時間試験 | $2250 \text{ kV}$ , $1950 \text{ kV}$ ㉕      |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |
|   |                                                                                                                                                                        |                                              |                                         |

5. 試験電圧がGISの寸法・重量に与える影響

付7-3表により雷インパルス試験電圧に対するGISの寸法・重量の変化傾向を示すと付7-4表のとおりである。なお、表中のⅣ、Ⅴ欄は、0気圧耐電圧を課した値を参考までに併記したものである。この表からもLIWLの低減が直ちにGISの経済設計に関係することが明らかである。

付7-4表 雷インパルス試験電圧とGISの寸法・重量の関係

| 区分                    | 項目                    | 系統最高電圧(kV)<br>試験電圧パラメータ | 1 2 0 0      |              |              |              |              |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                       |                       |                         | I            | Ⅰ            | Ⅱ            | Ⅳ            | Ⅴ            |
| 試験電圧                  | 雷インパルス (kV)           |                         | 2 7 0 0      | 2 5 5 0      | 2 2 5 0      | —            | —            |
|                       | 開閉インパルス (kV)          |                         | 2 2 5 0      | 2 1 0 0      | 1 9 5 0      | —            | —            |
|                       | 交流短時間 (kV)            |                         | —            | —            | —            | —            | —            |
|                       | 0気圧交流耐電圧 (kV)         |                         | —            | —            | —            | 8 8 0        | 6 9 3        |
| しゃ断器                  | 寸法W×L×H (m)           |                         | 2.7×10.7×3.1 | 2.6×10.7×3.0 | 2.5×10.7×2.9 | 3.2×10.8×3.7 | 2.9×10.8×3.3 |
|                       | 体 積 (m <sup>3</sup> ) |                         | 8 9.5        | 8 3.5        | 7 7.6        | 1 2 7.9      | 1 0 3.4      |
|                       | 本体重量 (t/相)            |                         | 2 9.5        | 2 8.3        | 2 6.5        | 3 5          | 3 1.3        |
| 断 路 器                 | 寸法W×L×H (m)           |                         | 1.7×3.8×2.7  | 1.6×3.8×2.6  | 1.5×3.7×2.6  | 2.1×4.5×2.9  | 1.9×4.3×2.6  |
|                       | 体 積 (m <sup>3</sup> ) |                         | 1 7.4        | 1 5.8        | 1 4.4        | 2 7.4        | 2 1.2        |
|                       | 本体重量 (t/相)            |                         | 6.9          | 6.5          | 6.0          | 8.3          | 7.4          |
| 計変<br>器圧<br>用器        | 寸 法 (径) (mφ)          |                         | 1.5          | 1.5          | 1.4          | 2.0          | 1.9          |
|                       | 本体重量 (t/相)            |                         | 1.4          | 1.4          | 1.3          | 1.7          | 1.6          |
| 変<br>流<br>器           | 寸 法 (径) (mφ)          |                         | 1.7          | 1.7          | 1.6          | 2.1          | 2.0          |
|                       | 本体重量 (t/相)            |                         | 1.1          | 1.1          | 1.0          | 1.4          | 1.3          |
| 避<br>雷<br>器           | 寸 法 (mφ×mL)           |                         | 1.8×8.3      | 1.8×8.2      | 1.7×8.2      | 2.2×8.3      | 2.0×8.3      |
|                       | 体 積 (m <sup>3</sup> ) |                         | 2 1.1        | 2 0.9        | 1 8.6        | 3 1.5        | 2 6.1        |
|                       | 本体重量 (t/相)            |                         | 1 3.7        | 1 3.5        | 1 3.3        | 1 6.5        | 1 5.2        |
| 母<br>線                | 寸 法 (mφ)              |                         | 1.1 3        | 1.0 8        | 0.9 8        | 1.6 2        | 1.4 0        |
|                       | 本体重量 (kg/m)           |                         | 1 6 0        | 1 5 2        | 1 4 3        | 2 1 7        | 1 9 3        |
| ブ<br>ッ<br>シ<br>ン<br>グ | 寸 法 (mL)              |                         | 1 8.5        | 1 8.5        | 1 8.5        | 1 8.5        | 1 8.5        |
|                       | 本体重量 (t/相)            |                         | 2 2.7        | 2 2.7        | 2 2.7        | 2 2.7        | 2 2.7        |

## あ　と　が　き

筆者は昭和28年京都大学工学部電気工学科を卒業後、直ちに関西電力株式会社に奉職し、主として変電関係の業務を通じて、275KV系統の拡充、500KVの導入とわが国の高度成長期における1次系統の電力増強に従事し、原子力関係の業務を経た後、現在は次期電圧であるUHV関係をはじめ高電圧大容量機器の開発に参画している。

GISについては、1965年500KV変電所の具体的設計を推進するにあたり、用地事情から、以前より構想を抱きつづけていた縮小形密閉式母線の必要性を痛感し、当時ようやく開発に成功し実用の域に達したSF<sub>6</sub>ガスしゃ断器の技術をいかして、GISとして画期的な開閉装置を開発することを計画し、成案を得て三菱電機と共同研究を行い、1967年世界に伍して77KV試作器を完成、第一步を印することに成功することができた。その後、第3章に述べた世界最初の500KVGISの建設計画、設計および建設後のサージ特性実測試験にも直接関与し、緒言においてふれたようにGIS時代の到来とともに、さらに本格的な経済設計の追究が必要と考え、現在なお小形改良形GIS母線、高性能しゃ断器の開発、高性能避雷器の開発をはじめ諸性能の向上化に取り組む等GISとのかゝわりは極めて深いものがある。

発電所の耐雷設計については、1955年頃よりようやく積極的な検討が行われるようになり、特にこの数年は高性能のシュミレーターや大型計算機の発達によって解析面の著しい進歩がみられる。しかし、GISやZnO避雷器等の新しい分野については勿論、鉄塔をはじめとする従来の分野においても的確な解析が行われているとは言い難く、特にGISの経済設計をはかる上でその背景となるGIS変電所に対するより精度の高い耐雷設計法の確立の必要性を痛感し、諸先輩の御指導と多くの方々の御協力を得て研究をすすめてきた。

この論文は、これらの研究の成果をまとめたもので、これによりGISに関する永年の大きな懸案の一つを解決することができ、その責任の一端を果たし得たものとよろこんでいる次第である。

最後に、いまは亡き恩師、元京都大学工学部名誉教授 大久保達郎 先生には在学中、就職後を問わず、公私にわたり格別の御薫陶をうけ、論文作成についても早くから再三にわたり御鞭達と御指導を頂いた。ここに漸くこの論文をとりまとめ得た機会に、更めて御遺徳をお偲びする次第である。

以　上